

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева  
Дальневосточного отделения Российской академии наук

На правах рукописи

УДК 551.465.7



Болсуновский Михаил Алексеевич

# Геосферное взаимодействие в инфразвуковом диапазоне

1.6.17 – Океанология

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

Кандидата физико-математических наук

Научный руководитель

д.ф.-м.н. академик РАН профессор

Долгих Григорий Иванович

Владивосток – 2026

## Оглавление

Введение .....	4
Глава 1. Атмосферно-гидросферно-литосферный комплекс .....	11
1.1. ГНСС-данные ионосферы .....	11
1.1.1. Глобальные навигационные спутниковые системы .....	11
1.1.2. Ионосфера.....	15
1.2. Лазерные деформографы.....	25
1.2.1. Лазерные деформографы на МЭС «м. Шульца» .....	27
1.3. Лазерный нанобарограф .....	30
1.4. Морские уровнемерные станции .....	32
1.5. Взаимодействие геосфер .....	33
1.6. Выводы к главе .....	36
Глава 2. Регистрация атмосферных возмущений вызванных взрывными извержениями вулканов .....	38
2.1. Описание ГНСС-комплекса. Состояние ионосферы. Обработка ГНСС-сигнала.....	38
2.1.1. Описание ГНСС-комплекса .....	38
2.1.2. Состояние ионосферы .....	40
2.1.3. Обработка ГНСС-сигнала .....	41
2.2. Анализ полученных результатов ГНСС-данных.....	42
2.3. Регистрация атмосферных возмущений лазерным интерферометрическим комплексом.....	47
2.4. Выводы к главе .....	52
Глава 3. Регистрация метеоцунами морскими уровнемерными станциями Тихого океана и Японского моря .....	53
3.1. Уровнемерные станции.....	53
3.2. Регистрация метеоцунами .....	54

3.3 Выводы к главе .....	70
Глава 4. Воздействие атмосферных колебаний на гидросферу .....	71
4.1. Метод сравнения данных.....	71
4.2. Обработка и анализ данных .....	72
4.3. Выводы по главе .....	87
Заключение.....	89
Список литературы.....	90

## **Введение**

### **Актуальность темы исследования.**

Исследование геосферного взаимодействия представляет собой ключевое направление в изучении волновых процессов и колебаний природных сред. Как антропогенные, так и природные явления оказывают прямое или косвенное воздействие на различные геосферы: порождая колебания в одной из них, они инициируют их распространение и трансформацию при переходе в другие геосферы. В частности, интенсивные атмосферные колебания способны вызывать колебания уровня моря и вызывать различные явления, например, метеоцунами. В этой связи принципиально важно не только фиксировать сами колебания, но и устанавливать их первоисточник.

Особую значимость приобретает изучение геосферных процессов, сопряжённых с катастрофическими природными явлениями, так-как они оказывают большое влияние на окружающую среду и жизнь человека. Изучение гидросферных, атмосферных и литосферных процессов, связанных с катастрофическими явлениями, позволяет определить природу возникновения регистрируемых различными приборами колебаний, а также предсказать их последствия. К таким катастрофическим процессам надо отнести землетрясения, цунами, метеоцунами, тайфуны, катастрофические шторма и, конечно, взрывные извержения вулканов.

### **Степень разработанности темы исследования.**

Теоретической основой выполненных в рамках данной работы исследований послужили работы отечественных и зарубежных авторов по исследованию состояния и колебаний литосферы, гидросферы и атмосферы.

В основу экспериментальной базы исследования состояния литосферы и атмосферы легли данные многолетних записей лазерных деформографов и лазерного нанобарографа, расположенных на морской экспериментальной станции



(МЭС) «м. Шульца». А в основу экспериментальной базы исследования состояния гидросферы и ионосферы — данные сетей морских уровнемерных станций и сетей приемников глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС/GNSS), входящих в международную сеть International GNSS Service (IGS), и приемников, расположенных на территории Приморского края.

Настоящая диссертация является законченным научным исследованием, в котором описаны геосферные возмущения, природа их возникновения и их первоисточники.

### **Цели и задачи диссертационной работы.**

Целью работы является изучение механизмов воздействия атмосферных возмущений, вызванных катастрофическими и не катастрофическими природными процессами и явлениями, на гидросферу и литосферу, а также определение первоисточников зарегистрированных геосферных возмущений.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- 1) Обработаны записи лазерного нанобарографа, лазерных деформографов, ГНСС-данных ионосферы, данных морских уровнемерных станций;
- 2) Проанализированы результаты обработки данных лазерного нанобарографа, лазерных деформографов и ГНСС-данных ионосферы;
- 3) Проанализированы данные морских уровнемерных станций;
- 4) Сравнены результаты обработки данных морских уровнемерных станций с ГНСС-данными ионосферы;
- 5) Выполнена интерпретация полученных результатов.

### **Научная новизна.**

1. Лазерными деформографами, установленными на МЭС «м. Шульца», не зафиксировано возмущение, прошедшее по земной коре от места мощного

взрывного извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай, случившегося 15 января 2022 года в 04:02 по всемирному координированному времени (UTC), до места расположения данных установок. По синхронным данным лазерного нанобарографа (установленного на МЭС «м. Шульца») и ГНСС-данным ионосферы были обнаружены атмосферные возмущения, достигшие МЭС «м. Шульца». На записях лазерного нанобарографа и двух лазерных деформографов с ориентацией измерительных плеч «север-юг» и «запад-восток» зафиксирован импульс, пришедший по атмосфере от места взрывного извержения вулкана, и который воздействовал на земную кору в месте расположения данных измерительных систем.

2. По данным морских уровнемерных станций, расположенных в Тихом океане и в Японском море, было установлено, что колебания уровня моря, зафиксированные после мощного взрывного извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай, не являются колебаниями, вызванными распространением классического цунами от места расположения вулкана, а обусловлены метеоцунами, возбужденными в конкретных районах Тихого океана мощным атмосферным импульсом, движущимся в атмосфере со скоростью, близкой к скорости звука в воздухе, которая значительно превышает вероятную скорость волны классического цунами.

3. По данным морских уровнемерных станций и ГНСС-данным ионосферы обнаружены гидросферные и ионосферные колебания с совпадающими значениями периодов.

4. Исследован комплекс геосферных возмущений, связанных с уникальным явлением, – взрывным извержением вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 года в 04:02 UTC, сопоставимым по мощности взрыва с взрывным извержением вулкана Кракатау в 1883 г.

## **Теоретическая и практическая значимость**

В условиях постоянного возникновения природных и антропогенных процессов и явлений исследование физических законов их вызывающих сохраняет высокую актуальность. Это обусловлено тем, что эти процессы напрямую влияют на состояние окружающей среды и качество жизни человека. Одним из ключевых направлений в этой области выступает изучение геосферных процессов различных частотных диапазонов, особенно инфразвукового диапазона. Регистрация и анализ геосферных колебаний позволяют лучше понять по каким физическим законам происходит развитие этих процессов, а также какие последствия стоит ожидать при возникновении катастрофических явлений. При этом нередко данных о состоянии лишь одной геосферы оказывается недостаточно для полного исследования механизмов волновых процессов. Расширение комплекса научно-технического оборудования и разработка современных методов обработки данных позволяют решать данную проблему.

## **Методология и методы исследования**

Для решения поставленных задач необходимо использование комплекса современного научно-технического оборудования и развитые сети международных и российских морских уровнемерных станций и ГНСС-станций. При обработке и анализе данных необходимо использование современных методов фильтрации данных, для выявления колебаний в определенных диапазонах периодов, а также применение современных методов спектрального и статистического оценивания.

Для обработки ГНСС-данных использовались программные обеспечения "tec-suite" и "Viewtocs". Для обработки данных деформографов, нанобарографа и уровнемерных станций использовалось программное обеспечение "Deformograph". Для анализа и визуализации данных использовались программные обеспечения "MATLAB", "Generic Mapping Tools" и "Excel".

Для получения информации о состоянии ионосферы, необходимой для обработки ГНСС-данных, были использованы данные о состоянии геомагнитной обстановки Потсдамского центра имени Гельмгольца, а также данные модели ионосферы IRI2016.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Одновременная регистрация лазерным нанобарографом и лазерным деформографом аномальных атмосферных возмущений, вызванных мощным взрывным извержением вулкана, позволила не только установить среду распространения этих возмущений от вулкана до места их регистрации, но и оценить уровень нагружающего воздействия атмосферных процессов инфразвукового диапазона на земную кору.

2. Результаты обработки данных морских уровнемерных станций позволили установить факт возбуждения метеоцунами в местах расположения морских уровнемерных станций, а также описать механизм их возбуждения мощным атмосферным импульсом, движущимся в атмосфере со скоростью в несколько раз больше скорости вероятной волны цунами над морскими уровнемерными станциями Тихого океана и Японского моря.

3. Установленное совпадение периодов инфразвуковых колебаний водной поверхности, полученных при обработке данных уровнемерных станций в «спокойные» интервалы наблюдений, и собственных колебаний атмосферы конкретных областей, полученных при обработке ГНСС-данных, позволило определить первоисточник этих возмущений, ярко проявляющихся в колебаниях ионосферного слоя.

### **Степень достоверности и апробации результатов**

Полученные результаты работы основаны на результатах обработки данных комплекса различных видов научно-технического оборудования, что позволило изучить описанные в работе явления в разных геосферах и их влияние на смежные геосферы. Многолетний опыт соавторов публикаций по материалам данной работы,

научного руководителя Долгих Григория Ивановича, а также различные монографии и научные публикации по теме исследования, позволили выполнить интерпретацию описываемых в работе явлений и сформировать выводы. Существующие математические методы обработки данных, фильтрация, спектральный и статистический анализ позволили выполнить сравнение результатов, полученных при анализе состояния геосфер.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на различных научных семинарах и следующих научных конференциях:

Конгресс молодых ученых Беларуси и России, 27–31 марта 2023 г., Минск, Беларусь;

X конференция молодых учёных «Океанологические исследования», 24–28 апреля 2023 г., Владивосток, Россия;

XIII Всероссийский симпозиум «Физика геосфер», 11–15 сентября 2023 г., Владивосток, Россия;

XI Всероссийская конференция молодых учёных с международным участием «Океанологические исследования», 26–30 мая 2025 г., Владивосток, Россия.

XIV Всероссийский симпозиум «Физика геосфер», 8–13 сентября 2025 г., Владивосток, Россия.

### **Публикации**

Материалы диссертации опубликованы в 7 статьях в научных рецензируемых журналах, из которых 6 входят в перечень ВАК, а также опубликовано 6 тезисов и материалов конференций.

### **Личный вклад авторов**

Автор самостоятельно выполнил большой объем обработки данных, используемых в данной работе, совместно с научным руководителем Григорием Ивановичем Долгих сформулировал цели, задачи и положения, выносимые на

защиту. Автор совместно с соавторами научных публикаций по материалам данной работы выполнил анализ и объяснение полученных результатов.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, и библиографии. Общий объем диссертации 101 страница, из них 77 страниц текста, включая 64 рисунка. Библиография включает 99 наименований на 12 страницах.

### **Благодарности**

Автор выражает благодарность научному руководителю в ТОИ ДВО РАН академику РАН, профессору д.ф.-м.н. Долгих Григорию Ивановичу за вклад в формирование научных навыков исследования геосферных процессов. Автор выражает благодарность научному руководителю в ДВФУ директору департамента мониторинга и освоения георесурсов к.т.н. доценту Шестакову Николаю Владимировичу в формировании научных навыков исследования состояния ионосферы. Автор выражает благодарность коллективу лабораторий физики геосфер (2/1) и нелинейной гидрофизики и природных катастроф (2/5) ТОИ ДВО РАН за помощь в обработке и получении экспериментальных данных лазерных деформографов и лазерного нанобарографа.

Автор выражает благодарность АО «ПРИН», ООО «АЭРОФОТОПРОМ», ООО «Меридиан», ИПМ ДВО РАН и ДВФУ за ГНСС-данные по используемым в анализе ГНСС-станциям на территории Приморского края и признателен научному сотруднику ИСЗФ СО РАН, к.ф.-м.н. Воейкову С.В. за предоставление программного обеспечения Viewtecs.

## **Глава 1**

### **Атмосферно-гидросферно-литосферный комплекс**

Первая глава диссертационной работы посвящена обзору и описанию средств входящих в атмосферно-гидросферно-литосферный комплекс, используемых для мониторинга и зондирования геосфер, в главе приводится обзор литературы по теме исследования. В разделе 1.1 ГНСС, и описывается исследуемая с помощью этих систем ионосфера. В разделах 1.2 и 1.3 описываются лазерные деформографы и лазерный нанобарограф (соответственно). В разделе 1.4 описаны средства, используемые для изучения колебаний уровня моря. В разделе 1.5 кратко описаны основные процессы взаимодействия геосфер и приводится описание явления метеоцунами.

Материалы главы посвященные планетарному лазерно-интерферометрическому сейсмоакустическому комплексу деформографов и межгеосферному взаимодействию в гравитационном и инфрагравитационном диапазонах представлены в работах [1-4].

#### **1.1. ГНСС-данные ионосферы**

##### **1.1.1. Глобальные навигационные спутниковые системы**

Глобальной навигационной спутниковой системой (ГНСС) является комплекс космических аппаратов, различного наземного оборудования и пользовательской аппаратуры. Данный комплекс предоставляет возможность получать координаты местоположения объекта в пространстве в заданной системе координат, получать значения скорости объекта, определять и синхронизировать время в определенной точке, а также измерять другие параметры, величины и вариации величин, путем обработки спутникового сигнала.

ГНСС состоят из трех основных частей называемых сегментами (подсистемами) [5] (рис. 1.1):

1) космический сегмент, включающий в себя набор спутников, который называют «созвездием»;

2) сегмент управления и контроля, состоящий из центральной (Ведущей) станции и нескольких станций слежения, расположенных в разных точках земного шара. Кроме того, имеются средства развертывания и восполнения системы (космодром);

3) сегмент пользователей, включающий в себя широко распространенную аппаратуру пользователей.

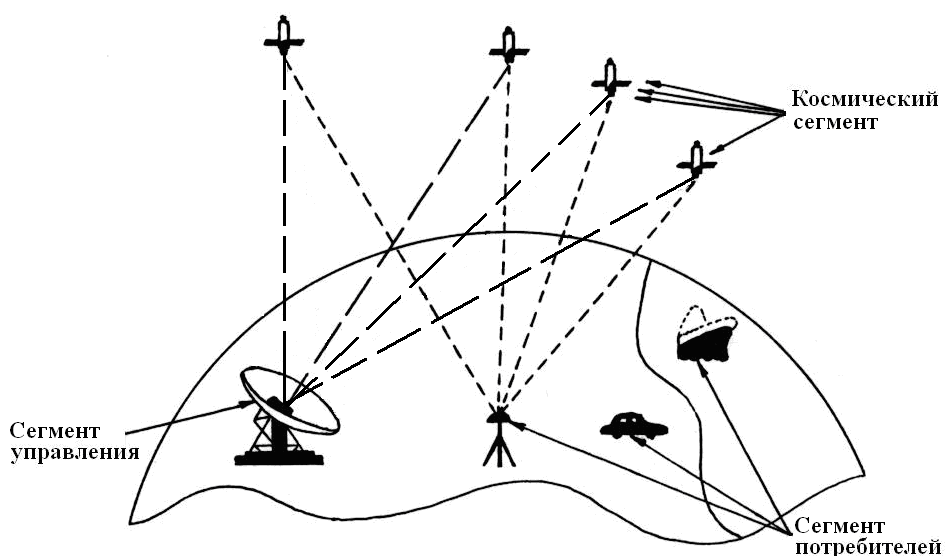


Рис. 1.1. Сегмент ГНСС [5].

#### 1.1.1.1. Спутниковые группировки ГЛОНАСС и GPS

В настоящее время существует множество различных ГНСС систем имеющих свои группировки спутников. К основным и наиболее известным относятся следующие системы:



1) ГЛОНАСС – Глобальная Навигационная Спутниковая Система (Российская Федерация), 27 спутников на орбите (используется по целевому назначению 24 спутника, 3 – в резерве) [6];

2) GPS – Global Positioning System (Соединенные Штаты Америки), 32 спутника на орбите (используется по целевому назначению 32 спутника) [7];

3) BeiDou – навигационная спутниковая система «Бэйдоу» (Китайская Народная Республика), 54 спутника на орбите (используется по целевому назначению 44 спутника, 10 – используется не по целевому назначению) [8];

4) Galileo – Европейская спутниковая система навигации (Европейский Союз), 32 спутника на орбите (используется по целевому назначению 27 спутника, 5 – используется не по целевому назначению) [9].

Также существуют Японская Квази-Зенитная Спутниковая Система (QZSS) [10] и Индийская Региональная Навигационная Спутниковая Система (IRNSS или NAVIC) [11] и др.

В настоящей работе используются ГНСС-данные, полученные с помощью систем ГЛОНАСС и GPS.

ГЛОНАСС – российская спутниковая система навигации [12]. ГЛОНАСС предоставляет общий доступ к сигналу глобального позиционирования на двух несущих частотных диапазонах  $L1 = \sim 1602$  МГц и  $L2 = \sim 1246$  МГц. В спутниковую группировку входит 24 космических аппарата, движущихся в трех орбитальных плоскостях (по 8 аппаратов в каждой плоскости), наклоненных к экватору под углом  $64,8^\circ$ , высота орбит  $\sim 19\,100$  км.

GPS – американская система глобального позиционирования. Открытыми для общего использования являются частотные диапазоны  $L1 = 1575,42$  МГц и  $L2 = 1227,60$  МГц. Спутниковая группировка GPS насчитывает 32 космических аппарата, движущихся в шести орбитальных плоскостях (5 спутников в 1-ой плоскости и с 3-ей по 6-ую плоскостях, 7 спутников – во второй плоскости), высота орбит  $\sim 20\,200$  км, наклон орбит к экватору равен  $55^\circ$ .

На рисунке 1.2 представлены орбиты ГЛОНАСС и GPS.

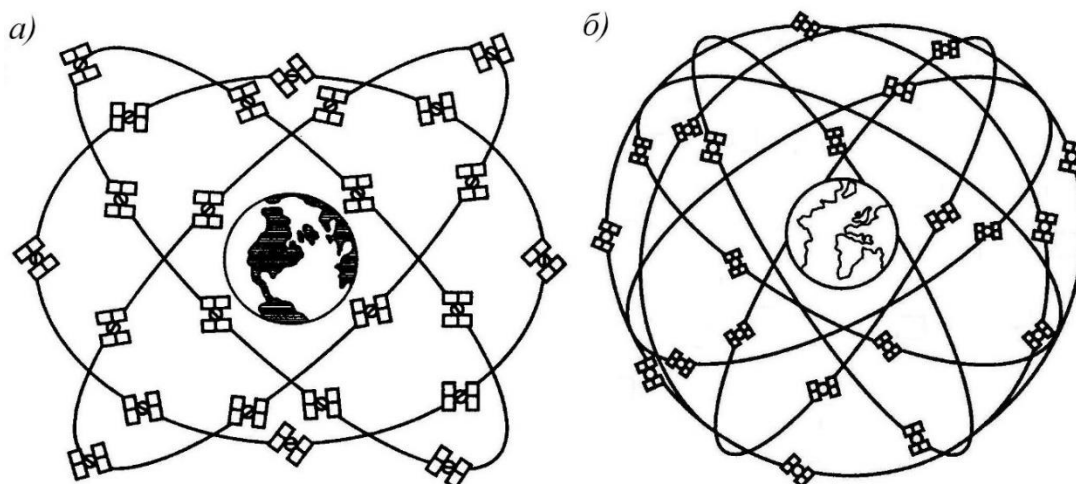


Рис. 1.2. Орбиты ГЛОНАСС (а) и GPS (б) [5].

#### 1.1.1.2. Постоянно действующие ГНСС-станции

Постоянно действующими ГНСС-станциями называют аппаратно-программный комплекс, предназначенный для обеспечения выполнения измерений и определения пространственного местоположения объектов путем предоставления информации для коррекции данных [13]. В состав такого комплекса входят: ГНСС-приемник, антенна, источник бесперебойного питания (для осуществления непрерывной работы оборудования), грозозащита, а также средства связи.

ГНСС-станции могут работать автономно без участия оператора. Данные с базовых станций передаются автоматически или вручную в специальные базы данных закрытого или общего пользования (в зависимости от того, в чьем распоряжении находятся ГНСС-станции). ГНСС-станции используются различными организациями, гражданского военного или научного направления. В науке ГНСС-станции можно использовать для отслеживания динамики литосферных плит [14], для оценки влияния сдвигов литосферных плит вызванными землетрясениями [15], для проведения измерений в области

метеорологии и экологии [16], для измерения вариаций полного электронного содержания (ПЭС или ТЕС - Total Electron Content) [17, 18] и других научных исследований.

На рисунке 1.3 представлен пример постоянно действующей ГНСС-станции, установленной на территории МЭС «м. Шульца».



Рис. 1.3. ГНСС-станция, расположенная на МЭС «м. Шульца».

### 1.1.2. Ионосфера

Атмосфера – это газовая оболочка Земли с содержащимися в ней аэрозольными частицами, движущаяся вместе с Землей в мировом пространстве как единое целое и одновременно принимающая участие во вращении Земли [19].

По концентрации ионов атмосферу разделяют на два слоя: атмосферу (высоты от поверхности Земли от 0 до 50 (60) км) и ионосферу (высоты от поверхности Земли выше 50 (60) км) [20].

Слой ионосферы (в этом слое в большом количестве содержатся ионы) начинается от высот над поверхностью Земли приблизительно равных 50–60 км, высот, где содержание электрически заряженных частиц начинает резко возрастать, за верхнюю границу ионосферы принимают значение близкое к 1000 км, максимальное увеличение концентрации частиц происходит до высот близких к 300 км, выше этих значений высот концентрация частиц начинает падать. Ионосфера является средой чувствительной к различным антропогенным и природным процессам, вызывающим возмущения в ионосфере. В слое ионосферы происходят наибольшие искажения ГНСС-сигнала. "Ионосферные ошибки" являются вторым по величине источником ошибок в определении координат ГНСС-приемника.

Ионосфера представляет собой смесь газа из нейтральных атомов и молекул (в основном  $O_2$  и  $N_2$ ) с квазинейтральной плазмой [21].

ТЕС – это интегральная электронная концентрация, характеризующая количество свободных электронов в всей толще между двумя точками на трассе проходящего сигнала в колонне с поперечным квадратным сечением  $1 \text{ м}^2$  между спутником и ГНСС станцией. ТЕС измеряется в единицах ТЕС обозначаемыми "TECU",  $1 \text{ TECU} = 1 \cdot 10^{16} \text{ электронов/м}^2$ .

В ионосфере выделяются отдельные слои — это связано с разной интенсивностью процессов ионизации и рекомбинации. На отдельных высотах концентрация ионов сильно повышена, также в ионосфере имеются области находящиеся в постоянном движении, называемые ионными облаками (концентрация ионов в этих областях сильно отличается от концентрации ионов в окружающей среде ионосферы).

Выделяют три области максимума ионизации, которые обозначаются латинскими буквами D, E и F (в слое F выделяют области F1 и F2), в них концентрации ионов меняются от сезона к сезону [21]. Основные характеристики ионосферных слоев для средних широт приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Значения некоторых характеристик ионосферных слоев [21].

Слой	Высота максимума, км	Температура, К	Концентрация электронов, см <sup>-3</sup>			Основной фактор ионизации
			День (min.)	День (max.)	Ночь	
D	70	220	100	200	10	Рентгеновское солнечное излучение, в полярных районах – солнечный ветер
E	110	270	$1,5 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	3000	Рентгеновское и ультрафиолетовое солнечное излучение
F <sub>1</sub>	180	800-1500	$3 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	–	Ультрафиолетовое солнечное излучение
F <sub>2</sub> (зима)	220-280	1000-2000	$6 \cdot 10^5$	$25 \cdot 10^5$	$10^5$	Солнечное и космическое излучение
F <sub>2</sub> (лето)	250-320		$2 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	

#### 1.1.2.1. Искажение ГНСС-сигнала при его прохождении через ионосферу

Скорость распространения радиоволн сигнала между спутником и ГНСС-приемником зависит от длины волны. Через ионосферу могут проникнуть сигналы только определенной длины, — это волны длиннее 1 см и короче 10 м [22]. На рисунке 1.4 представлены окна прозрачности для радиоволн в атмосфере. Окна прозрачности могут меняться под действием внешних факторов (например, солнечной активности и изменениями геомагнитной обстановки). Миллиметровые волны через атмосферу не проникают. Поскольку ионосфера для радиоволн является диспергирующей средой, проходящие через ионосферу сигналы приходят с задержкой (или опережением). Зная значения задержек (опережений), можно определять величины вариаций TEC.

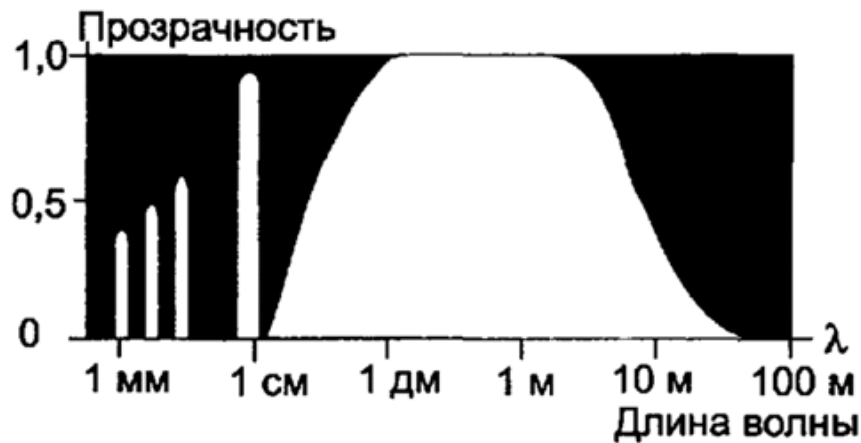


Рис. 1.4. Окна прозрачности в атмосфере для радиоволн [22].

При анализе влияния ионосферы на точность спутниковых измерений важно учитывать различие между фазовой и групповой скоростями распространения сигнала. Фазовая и групповая скорости вычисляются соответственно по формулам [21]:

$$v_{\phi} = \frac{c}{n_{\phi}} = \frac{c}{1 - \Delta_{\text{ион}}}, v_{\text{гр}} = \frac{c}{n_{\text{гр}}} = \frac{c}{1 + \Delta_{\text{ион}}} \quad (1)$$

где  $v$  – скорость распространения электромагнитного излучения,  $c$  – скорость света в вакууме,  $n$  – показатель преломления воздуха,  $\Delta_{\text{ион}}$  – ионосферная задержка сигнала.

Поскольку значение фазовой скорости больше групповой, в фазовых измерениях наблюдается эффект опережения, а в кодовых — эффект задержки сигнала. Задержки (опережения) в ионосфере зависят от квадрата частоты проходящего сигнала. Колебания частот L1 и L2 проходящего сигнала порождены одним источником. Значения частот имеют соотношение для спутников группировки ГЛОНАСС  $\frac{f_{L1}}{f_{L2}} = \frac{9}{7}$ ; для спутников группировки GPS  $\frac{f_{L1}}{f_{L2}} = \frac{154}{120} \approx \frac{9}{7}$  [23].

Ионосферная задержка сигнала вычисляется как разность между измеренным и геометрическим диапазоном [23]:

$$\Delta_{\text{ион}} = \int n ds - \int ds_0 \quad (2)$$

ТЕС определяется по формуле [23]:

$$TEC = \int N_e ds_0 \quad (3)$$

Для показателя преломления фазы  $n_{ph}$  и группового показателя преломления  $n_{gr}$ ,  $\Delta^{ион}$  будет определяться [23]:

$$\Delta_{\phi}^{ион} = -\frac{40,3}{f^2} TEC, \Delta_{гр}^{ион} = \frac{40,3}{f^2} TEC \quad (4)$$

В формуле (4) TEC представляет собой полное содержание электронов вдоль прямого пути сигнала между спутником и приемником. Поскольку длина пути сигнала в ионосфере зависит от зенитного угла, необходимо ввести два понятия: "наклонный" TEC и "вертикальный" TEC (значение зенитного угла равно  $0^\circ$ ), который обозначим — VTEC. Тогда, заменяя "наклонный" TEC на VTEC в формуле (4) и учитывая зенитный угол, получим формулу [23]:

$$\Delta^{ион} = \frac{1}{\cos z'} \frac{40,3}{f^2} VTEC \quad (5)$$

Влияние ионосферы для фазовой псевдодальности  $-\Delta^{ион}$ , для групповой псевдодальности моделируется  $+\Delta^{ион}$ .

Изменение дальности, вызванное преломлением ионосферы, может быть ограничено определением TEC. Сам TEC зависит от активности солнечных пятен, сезонных и суточных колебаний, линии визирования, высоты и азимут спутника, положения места наблюдения. TEC может быть измерен, оценен, его влияние может быть рассчитано с помощью различных моделей (Klobuchar, NeQuick и др.).

На рисунке 1.5 представлена геометрия задержки ГНСС-сигнала в виде однослойной модели ионосферы, по этой модели предполагается, что все свободные электроны сосредоточены в бесконечно тонкой сферической оболочке на высоте  $h_m$  и содержат ионосферную точку  $IPP$ ;  $R_e$  - средний радиус Земли,  $h_m$  — среднее значение высоты ионосферы, а  $z'$  и  $z_0$  — зенитные углы в точке ионосферы и в месте наблюдения [23]. Зенитный угол  $z_0$  может быть рассчитан для известного положения спутника и приблизительных координат места наблюдения.

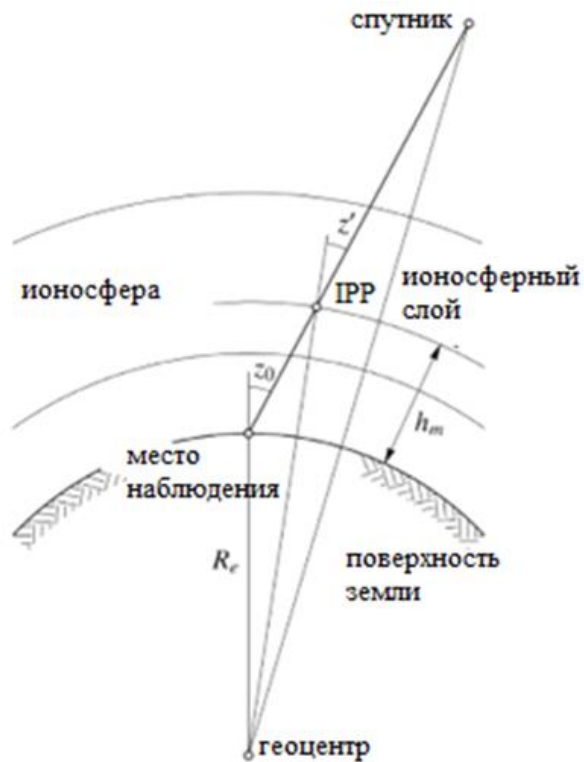


Рис. 1.5. Однослойная модель ионосферы [23].

Понимая механизм искажения ГНСС-сигналов через ионосферу, можно решить обратную задачу: на основе ГНСС-данных с учётом ионосферной задержки (опережения) определить величины ТЕС (VTEC), а затем проанализировать вариации полного электронного содержания ионосферы.

#### 1.1.2.2. Определение величины вариаций ТЕС, во время ионосферных возмущений

Различные импульсные явления на Земле, вызванные извержениями вулканов, землетрясениями, цунами и взрывами, — приводят к формированию волн атмосферного давления. В соответствии с их частотными параметрами выделяют два типа волн: акустические и гравитационные (рисунок 1.6).



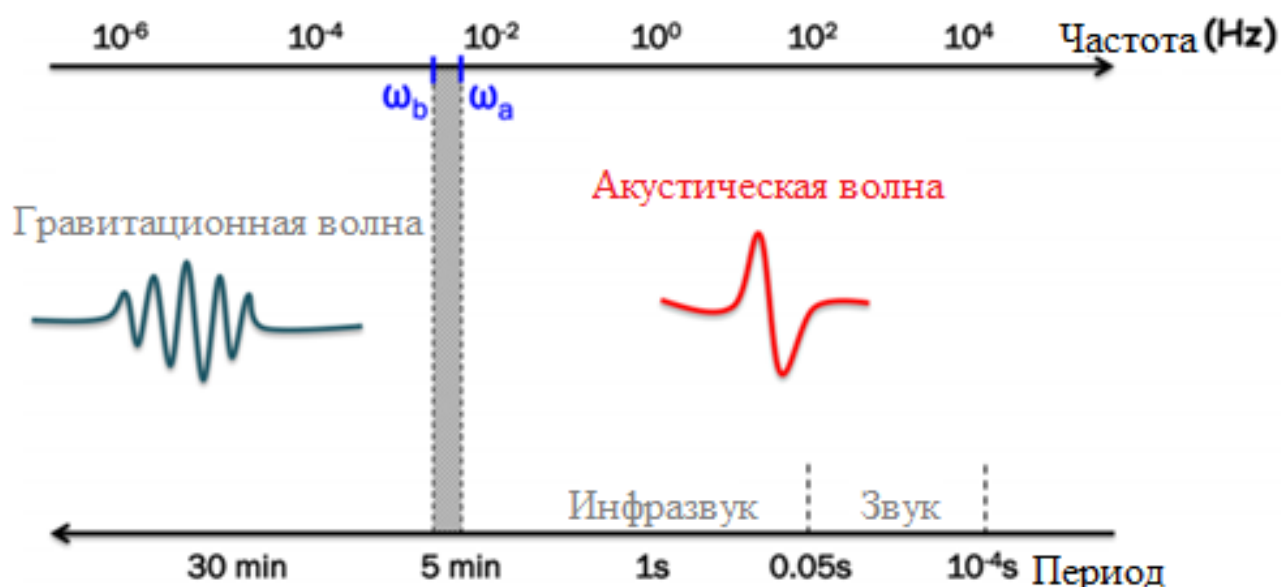


Рис. 1.6. Акустические и гравитационные волны [24].

Акустические волны относятся к продольному типу волн (направление движения частиц совпадает с направлением распространения волны). Частота акустических волн превышает значение акустической отсечки ( $\omega_a$ ), то есть имеет значение выше  $\sim 3,3$  мГц. Скорость распространения таких волн у поверхности Земли равна примерно 330 м/с, а на высоте ионосферы (250–300 км) возрастает до 800-1000 м/с. Чтобы достичь ионосферы, акустическим волнам требуется около 8-9 минут.

Для гравитационных волн характерна частота ниже частоты Бранта-Вейселя  $\omega_b$ ,  $\sim 2,9$  мГц в нижних слоях атмосферы. Из-за гравитационного воздействия эти волны движутся наклонно вверх. Скорость распространения гравитационных волн намного ниже скорости звука, а их групповые и фазовые вертикальные скорости противоположно направлены. Время, необходимое для достижения ионосферы, составляет 45–60 минут с момента их возникновения.

Колебания ионосферной плазмы, вызванные акустическими и гравитационными волнами, называются перемещающимися ионосферными возмущениями, сокращенно TIDs (traveling ionospheric disturbances).

ГНСС являются основным инструментом, используемым для наблюдений за TIDs, связанными с опасными природными явлениями.

Из-за дисперсионной природы ионосферы сигналы от двухчастотных ГНСС-приемников позволяют измерять  $TEC$  (формула 3).

По ГНСС-сигналам, передаваемым на двух различных несущих частотах,  $f_1$  и  $f_2$ , можно рассчитать дифференциальный (относительный) уклон  $TEC$  [24]:

$$TEC = \frac{1}{A} \cdot \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2 + const + nL) \quad (6)$$

где  $A = 40,308 \text{ м}^3/\text{с}^2$ ,  $L_1 \lambda_1$  и  $L_2 \lambda_2$  являются дополнительными путями сигнала, вызванными фазовой задержкой в ионосфере,  $const$  – неизвестный начальный фазовый путь,  $nL$  – ошибки в определении фазового пути.

Чтобы нормализовать амплитуду  $TEC$  и избежать влияния низких углов возвышения, наклонный  $TEC$  можно преобразовать в вертикальный  $VTEC$ , применив формулу [24]:

$$VTEC = TEC \cdot \cos \left[ \arcsin \left( \frac{R_z}{R_z + H_{ion}} \cos \theta_s \right) \right] \quad (7)$$

где  $R_z$  – радиус Земли,  $H_{ion}$  – высота слоя максимальной ионизации, а  $\theta_s$  – угол возвышения спутника.

Зная положения спутников и наземных ГНСС-приемников, можно определить координаты "точки" возмущений ТЕС. Предполагается, что ионосфера представляет собой тонкий слой оболочки, расположенный на высоте  $H_{ion}$  (рисунок 1.7), точка пересечения  $H_{ion}$  и прямой видимости ( $LOS$ ) между спутником и приемником называется точкой проникновения в ионосферу и обозначается  $IPP$ . Проекция  $IPP$  на поверхность Земли называется подионосферной точкой ( $SIP$ ).  $IPP$  и  $SIP$  позволяют отслеживать ионосферные возмущения ТЕС, наблюдаемые методом ГНСС.

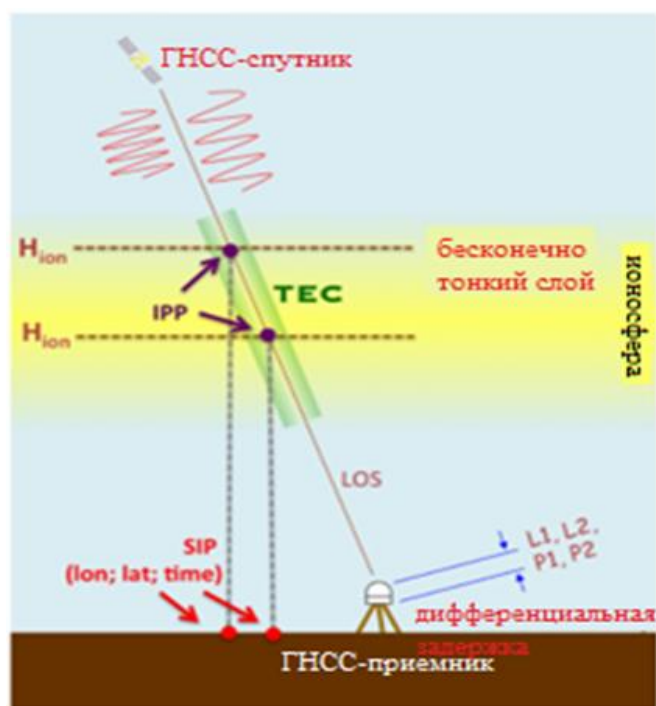


Рис. 1.7. ГНСС-зондирование ионосферы [24].

ГНСС-зондирование точно не определяет  $H_{ion}$ . Обычно предполагается, что возмущения, обнаруженные ГНСС, концентрируются вокруг высоты "слоя максимальной ионизации ионосферы" в слое  $F$  (обычно, в различных моделях ионосферы и при решении задач, связанных с ионосферой, обозначается как  $hmF2$ ).  $H_{ion}$  берется на расстоянии от 250 до 400 км с учетом сезонных и суточных условий. Изменение  $H_{ion}$  приведет к изменению координат  $IPP$  и  $SIP$  (рисунок 1.7).

Данный метод ГНСС-зондирования широко используется для изучения динамики ионосферы, однако он имеет недостаток, заключающийся в неоднозначности определения  $H_{ion}$ .

### 1.1.2.3. Извержения вулканов и ионосфера

При мощных вулканических извержениях возникают колебания давления, которые проявляются в виде волн различной природы: от инфразвуковых до гравитационных.

При извержениях вулканов могут возникать возмущения в атмосфере и ионосфере (рисунок 1.8). Гравитационные волны в атмосферном слое возникают как следствие ударных воздействий, связанных с извержением вулканов.

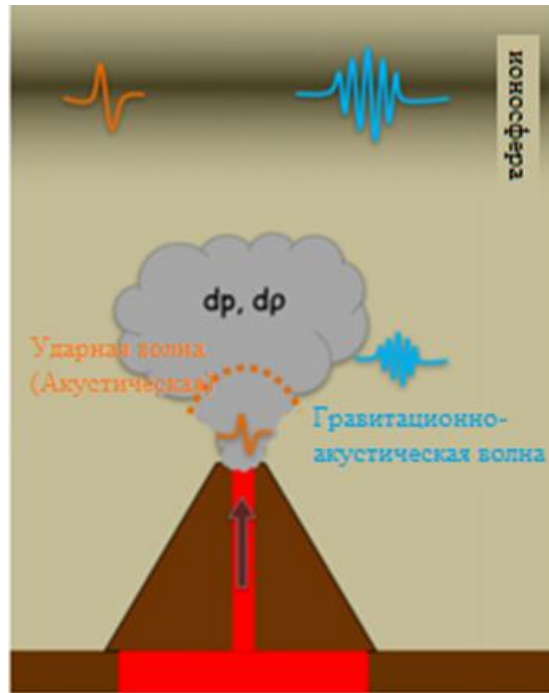


Рис. 1.8. Схема, показывающая генерацию ионосферных возмущений при извержении вулкана [24].

В ионосфере вулканические извержения провоцируют так называемые ковулканические ионосферные возмущения (КВИВ). Эти возмущения, как правило, носят квазипериодический характер и возникают спустя  $\sim 10$ -45 минут с момента начала извержения.

Индекс вулканической взрывоопасности (ИВВ) служит для оценки интенсивности извержений и варьируется в диапазоне от 0 до 8. При  $ИВВ = 0$  фиксируются непрерывные извержения, тогда как события с  $ИВВ = 8$  происходят крайне редко — примерно раз в 50 000 лет. На сегодняшний день известны реакции ионосферы только при  $2 \leq ИВВ \leq 6$ .

Амплитуда КВИВ растет с увеличением интенсивности извержений вулканов. Взрывное извержение ИВВ = 2 может вызвать небольшие возмущения ТЕС около 0,1 TECU, а ИВВ = 4 вызывает более сильные возмущения ТЕС, которые могут достигать 0,45 TECU [24].

## 1.2. Лазерные деформографы

Создание в 1935 году стрейн-сейсмографа Бениоффа [25] ознаменовало начало эры высокочувствительных безынерционных приборов. Рабочим элементом измерителя Бениоффа является цилиндр из плавленого кварца, у которого закреплённый в породе один конец служит опорной точкой, а на другом конце находится считывающая система, измеряющая изменение расстояния между этим концом и стойкой, также установленной в коренной породе. Впоследствии на базе этой разработки возникло множество механических деформографов, различающихся функциональным назначением и конструктивным исполнением.

Для корректной работы деформографов критически важно обеспечивать постоянство давления, влажности и температуры. Такие меры позволяют минимизировать влияние внешних факторов на результаты измерений. При этом колебания перечисленных параметров способны существенно изменить диэлектрическую проницаемость воздушной среды между обкладками измерительного конденсатора-датчика. Чувствительность деформографа близка к  $10^{-9}$  [26].

Разветвлённая международная сеть геофизических станций, ведущих непрерывные наблюдения за движениями земной коры, включает несколько сотен деформографических установок штангового или проволочного типа, чувствительность которых, в основном, составляет величину  $10^{-8}$  [27].

Недостатками в работе с механическими деформографом являются недостаточная чувствительность прибора в ряде приложений, а также значительное подверженность показаний приборов температурным вариациям, например для

кварцевого деформографа, описанного в [26] температурные вариации не должны превышать 0,1 К. Для обеспечения чувствительности  $10^{-9}$  необходимо поддерживать температуру в месте расположения прибора с точностью 0,001-0,0001 К.

Чтобы преодолеть недостатки механических деформографов, были разработаны лазерные деформографы. Их принцип действия основан на том, что изменение базы прибора влечёт за собой изменение оптического пути лазерного луча, проходящего между двумя опорными точками. Это приводит к изменению фазы волны лазерного излучения из-за дополнительного фазового набега (в большинстве случаев измеряемой величиной является изменение фазы). Главное преимущество лазерных деформографов над механическими — исключение (отсутствие) механического чувствительного элемента. Влияние вариаций метеорологических параметров на показания прибора сводится к их воздействию на изменение оптического пути лазерного луча. При использовании герметизированных или вакуумированных лучеводов точность измерения микродеформаций земной коры для лучших образцов составляет величину от  $10^{-10}$  до  $10^{-11}$  м, при чувствительности от  $10^{-12}$  до  $10^{-13}$  [28]. Создание лазерных деформографов различных модификаций позволило на 2-3 порядка улучшить точность измерения микродеформаций земной коры в частотном диапазоне от 0 (условно) до 1000 Гц по сравнению с применением деформографов механического типа. Благодаря использованию дифференциальных свойств среды и особых конструктивных решений удалось существенно повысить точность измерений микродеформаций земной коры. При этом стало допустимо некоторое снижение требований к стабильности метеорологических параметров (давление, температура, влажность) и относительно невысокой стабильности частоты лазера.

В 1965 году появились первые сведения о создании длиннобазового лазерного интерферометра для геофизических исследований. Вейли, Кругстад и Мосс [29] сообщили о разработке действующего макета лазерного деформографа на основе интерферометра Майкельсона. Экспериментальная эксплуатация

устройства дала ценные результаты по многолетним измерениям деформаций земной коры [30–32].

В настоящее время создано несколько десятков лазерных деформографов различных вариантов, использующих три метода отслеживания вариаций деформации земной коры с различными сочетаниями:

- слежение за полосой (метод был развит при создании 1020 метрового лазерного деформографа Vali & Bostrom [31]);
- подсчёт полос (разработали King & Gerard [33]);
- частотное биение (разработали Barger & Hall [34]).

Большинство современных лазерных деформографов работают индивидуально. Однако анализ данных от приборов, размещённых на значительных (в том числе планетарных) расстояниях друг от друга, позволяет получать результаты планетарного масштаба — как показано в работе [35]. Такие данные могут позволить получить новые результаты в изучении геосфер и межгеосферного взаимодействия. Для реализации этого подхода необходимо создать сеть пространственно-разнесённых лазерных деформографов, принцип создания такой сети изложен в работе [1, 2, 36].

В основе оптической схемы описываемых далее лазерных деформографов лежит неравноплечный интерферометр Майкельсона, с используемым в качестве источника излучения частотно-стабилизированный гелий-неоновый лазер.

### **1.2.1. Лазерные деформографы на МЭС «м. Шульца»**

Двухкоординатный лазерный деформограф, расположенный на м. Шульца Приморского края в месте с координатами 42°34'48.00"N, 131°09'24.00"E. Он состоит из двух однокоординатных лазерных деформографов неравноплечного варианта с длинами измерительных плеч 52.5 и 17.5 м.

Измерительное плечо 52.5-метрового лазерного деформографа ориентировано под углом  $18^\circ$  относительно линии «север-юг». Все конструктивные элементы лазерного деформографа находятся под землёй на глубине 3-5 м от поверхности земли. Угловой отражатель и центральный интерференционный узел лазерного интерферометра находятся под землёй в отдельных гидро-термоизолированных помещениях (рисунок 1.9б). Угловой отражатель расположен на бетонном основании высотой около 1 м, которое прочно соединено с гранитной скалой. Центральный интерференционный узел смонтирован на гранитно-бетонном устое высотой около 3.5 м. Луч лазера между центральным интерференционным узлом и угловым отражателем распространяется в вакуумированном/воздухонаполненном лучевом, собранном из труб из нержавеющей стали с внутренним диаметром 9 см (рисунок 1.9а). Применение современных методов интерферометрии позволяет измерять вариации смещения между устоями лазерного деформографа с точностью 10 нм.



Рис. 1.9. Подземный лучевод 52.5-метрового лазерного деформографа неравноплечего типа и центральный интерференционный узел.



Измерительное плечо 17.5-метрового лазерного деформографа ориентировано под углом  $92^\circ$  относительно оси 52.5-метрового лазерного деформографа, или  $110^\circ$  относительно линии «север-юг». Все конструктивные элементы лазерного деформографа находятся под землёй также на глубине 3-5 м от поверхности земли. Подземное помещение данного лазерного деформографа находится на расстоянии около 70 м от подземного помещения 52.5-метрового лазерного деформографа. Угловой отражатель и центральный интерференционный узел смонтированы на гранитно-бетонных блоках высотой 1.5 м, соединённых прочно с коренными породами м. Шульца. На рисунке 1.10 приведена фотография центрального интерференционного узла 17.5-метрового лазерного деформографа. Применение современных методов интерферометрии позволяет измерять вариации смещения между устоями лазерного деформографа с точностью 10 нм.

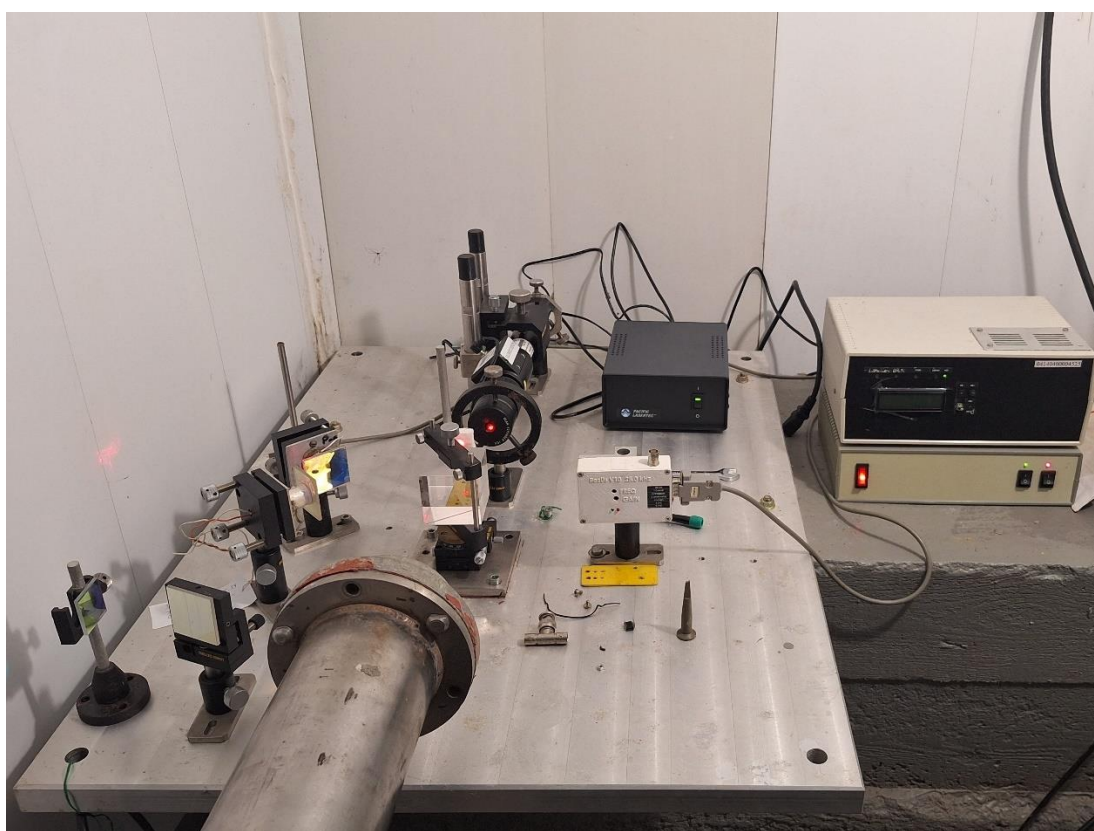


Рис. 1.10. Центральный интерференционный узел 17.5-метрового лазерного деформографа.

### 1.3. Лазерный нанобарограф

Для выполнения задач по изучению различных эффектов в бародеформационном взаимодействии в ТОИ ДВО РАН, на основе лазерно-интерференционных методов, был разработан лазерный нанобарограф [37].

Используемый в настоящее время лазерный нанобарограф создан на основе модифицированного равноплечего интерферометра Майкельсона с длиной измерительного плеча 20 см, частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера фирмы Melles Griott, обеспечивающего стабильность частоты в девятом разряде, блока анероидных коробок с зеркальным покрытием, цифровой системы регистрации и блока для передачи полученных данных в экспериментальную базу данных (Рисунок 1.11). Созданный лазерный нанобарограф регистрируют колебания атмосферного давления в диапазоне частот от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью до 50 мкПа.

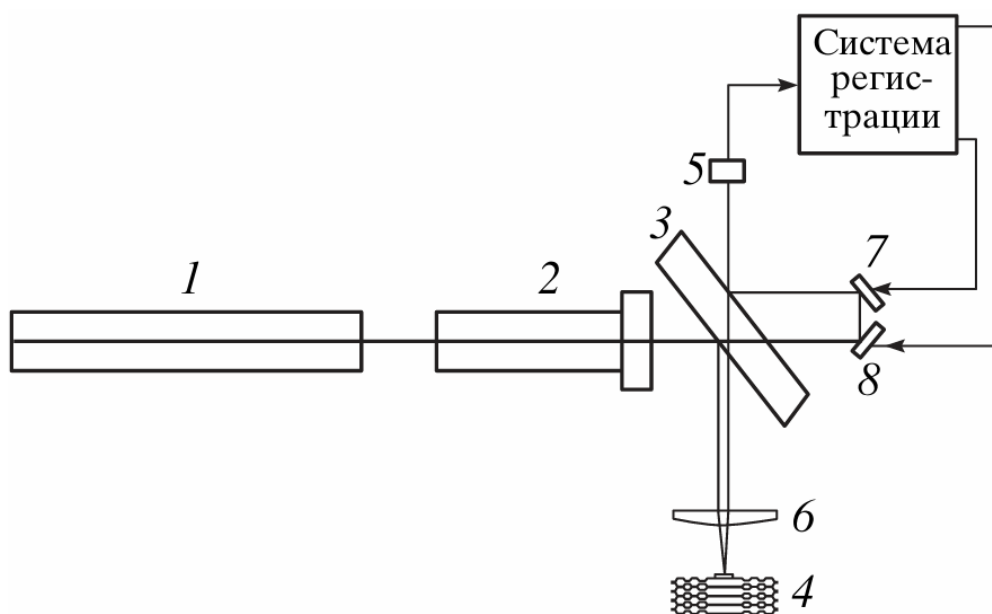


Рис. 1.11. Схема размещения оптических элементов лазерного нанобарографа: 1 - He-Ne лазер; 2 - коллиматор; 3 - делительная пластина; 4 - блок анероидных коробок с зеркальным напылением; 5 - фотоприёмник; 6 - линза; 7 - зеркало компенсации; 8 - зеркало раскачки [37].

Лазерный нанобарограф входит в состав лазерно-интерференционного комплекса, расположенном на м. Шульца, в месте с координатами  $42.581^{\circ}$  с.ш.  $131.157^{\circ}$  в.д., внешний вид данного прибора представлен на рисунке 1.12. Так-как температурные воздействия приводят к ошибкам в измерении вариаций атмосферного давления (точность ограничивается до 0,003 Па), прибор находится в гидро-термоизолированном помещении (температура поддерживается в пределах  $0,1^{\circ}$ ), также для учета влияния температурных колебаний проводится синхронное измерение вариаций температуры. Также, для обеспечения развязки нанобарографа от сейсмоакустического шума и упругих колебаний земной коры, оптическая скамья нанобарографа находится на резиновых шариках диаметром 5 см.

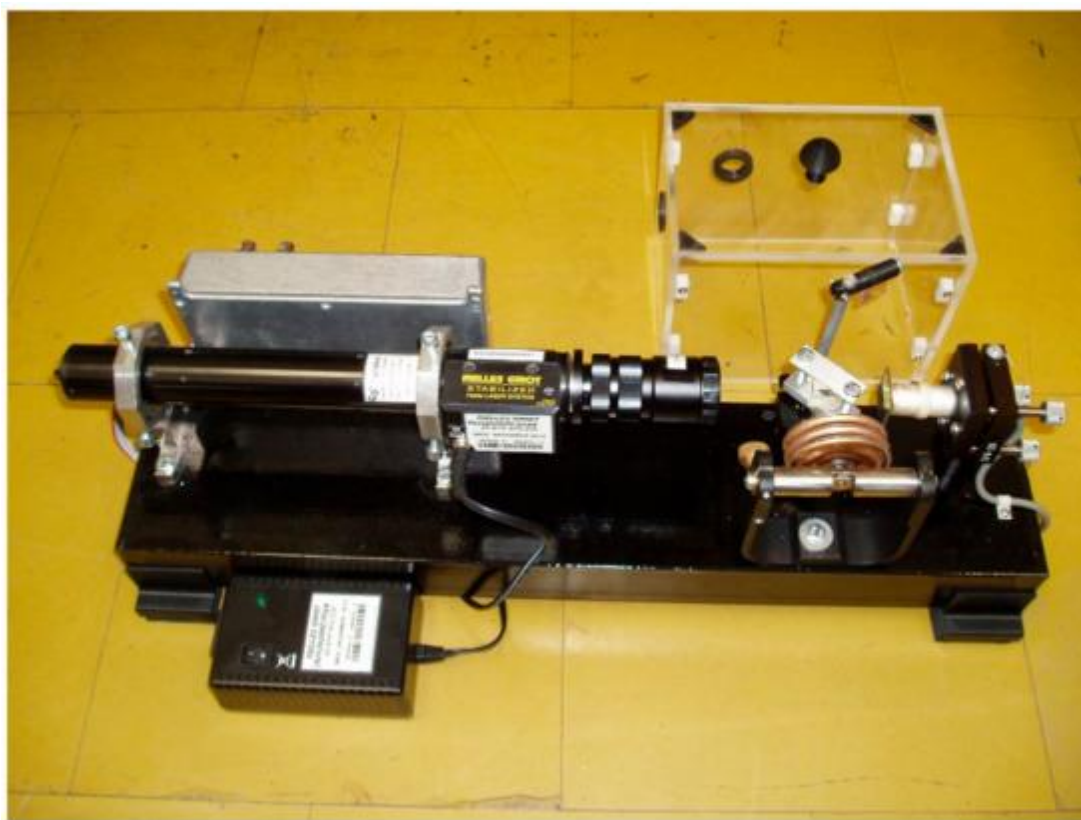


Рис. 1.12. Лазерный нанобарограф.

## 1.4. Морские уровнемерные станции

Уровень морей и океанов у побережий подвержен постоянным изменениям — от суточных до вековых колебаний, проявляющихся в различных пространственных масштабах. Это обуславливает необходимость непрерывного мониторинга уровня моря. Такие измерения представляют как научный интерес (позволяют изучать процессы в морской среде, а также взаимодействие гидросферы с другими геосферами), так и практическую ценность (для мореплавания, строительства и морского хозяйства). Кроме того, они открывают возможности для разработки систем прогнозирования цунами [38].

Колебания уровня моря обусловлены комплексом факторов: гравитационным воздействием Солнца и Луны, подводными землетрясениями, ветровыми нагонами, а также вариациями атмосферного давления. Последние включают как обычные погодные изменения, так и экстремальные явления — прохождение тайфунов и иные катастрофические события.

Для мониторинга колебаний уровня моря создаются уровнемерные станции и посты, где выполняются регулярные либо непрерывные измерения. Полученные данные собираются в базах данных организаций, в чьем распоряжении находится та или иная станция/пост. При этом часть информации может передаваться в открытые базы данных — например, в Sea Level Station Monitoring Facility [39].

Для измерения уровня моря применяется разнообразное оборудование, различающееся по конструкции, функциональному назначению и методам измерений. Среди основных приборов — береговые радары, мареографы, датчики давления и звуковые датчики уровня моря. На рисунке 1.13 показаны примеры таких измерительных устройств.



Рис. 1.13. Радар волн и течений (слева), береговой мареограф (справа), установленные на МЭС «м. Шульца».

## 1.5. Взаимодействие геосфер

Исследование физических процессов в геосферах (атмосфере, гидросфере, литосфере) и механизмов их взаимодействия остаётся важнейшей задачей современной науки. Прежде всего это обусловлено необходимостью выявлять источники возмущений, колебаний и волн в геосферах — такие знания крайне важны при анализе как катастрофических, так и некатастрофических природных и антропогенных явлений.

Волновые процессы в геосферах Земли возникают в разных оболочках планеты, распространяются через переходные зоны и вызывают в соседних геосферах колебания [40-42]. Так микросейсмические колебания верхнего слоя земной коры на побережье могут быть вызваны гравитационными и инфрагравитационными морскими волнами [43]. Атмосферный импульс,двигающийся по направлению к берегу, в некоторых случаях возбуждает метеоцунами на побережье [44]. Динамические процессы, протекающие в атмосфере, воздействуют на собственные колебания Земли [45].

Особый научный интерес представляют колебания с периодами от 15 минут до нескольких суток, а также феномен «инфрагравитационного гула Земли» с диапазоном от 1 до 15 минут.

Источниками колебаний «инфрагравитационного гула Земли» могут быть:

- колебания атмосферного давления, приводящие к колебаниям земной коры и к возбуждению внутренних морских волн [46-50];
- инфрагравитационные морские волны [51-55];
- преобразование энергии внутренних морских волн в энергию микродеформаций земной коры соответствующего периода.

Особая роль в возникновении колебаний и волн «инфрагравитационного гула Земли» часто отводится процессам, развивающимся в твёрдых оболочках Земли. Известно, что основная масса собственных крутильных и сфероидальных колебаний Земли приходится на диапазон 1-15 минут. Также при анализе «инфрагравитационного гула» важно принимать во внимание собственные колебания геоблоков.

В диапазон периодов от 15 м до нескольких суток основное внимание исследований сосредоточено на изучении физики возникновения, развития и трансформации колебаний и волн, вызванных:

- собственными колебаниями Земли [56-58];
- приливными процессами атмосферы, гидросферы и литосферы;
- собственными колебаниями некоторых бухт, заливов, морей и океанов [59];
- крупномасштабными атмосферными процессами [60];
- антропогенными процессами [61].

Одними из наиболее опасных гидрологических явлений, возникающих в результате воздействия литосферных и атмосферных возмущений на водную массу, являются цунами. Чаще всего цунами возникают вследствие подводных

землетрясений, оползней и извержений вулканов. Однако существуют цунами, возникновение которых обусловлено нелинейными атмосферными процессами [44]. Длинные океанические волны, порождённые атмосферными процессами, а не землетрясениями или оползнями, получили название — метеоцунами. Как показывают наблюдения, периоды и пространственные масштабы метеоцунами схожи с обычными цунами [44, 62].

Как показывают наблюдения, периоды и пространственные масштабы метеоцунами сопоставимы с обычными цунами. Подобные волны метеоцунами регистрировались в разных регионах мира — например, в июне 2014 года в Хорватии при отсутствии землетрясений уровень воды в бухте начал подниматься, затопляя прилегающие к порту улицы и дороги, на берегах Жёлтого моря неоднократно отмечались разрушительные метеоцунами, а наиболее часто такие явления фиксировались на побережьях Японии, Европы и Северной Америки [63; 64].

Для формирования сильного метеоцунами требуется сочетание некоторых факторов [65-70]:

- Интенсивные атмосферные возмущения. Резкие перепады атмосферного давления, сильные локальные ветровые нагрузки, прохождение фронтальных зон, шквалов, тайфунов или грозových фронтов;

- Резонанс между скоростью атмосферного возмущения и скоростью волны. Одни из предполагаемых резонансов — это "резонанс Проудмана" [69] и "резонанс Гринспана" [70];

- Благоприятная топография акватории. Наличие мелководных шельфов, заливов, бухт или проливов, усиливающих волновые колебания, резонирующие формы береговой линии, локальные особенности дна, способствующие фокусировке энергии волны;

- Синхронность процессов. совпадение по времени и пространству атмосферного возмущения и реакции водной массы, отсутствие процессов, "гасящих" волну;

– Метеорологические условия. устойчивые барические градиенты, поддерживающие длительное воздействие на поверхность воды, сочетание высокой влажности и температурных контрастов в атмосфере, усиливающих конвективные процессы;

Также есть факторы, зависящие от сезонности и климата. Важно отметить, что для возникновения метеоцунами чаще всего необходимо совпадение всех вышеперечисленных факторов, от чего данное явление остаётся редким.

## 1.6. Выводы к главе

Хотя по взаимодействию геосфер опубликовано множество научных работ, актуальность подобных исследований не снижается. Совершенствуются методы мониторинга геосфер, а также способы обработки и анализа получаемых данных. Для изучения их состояния создаётся и совершенствуется разнообразное научно-техническое оборудование. По мере развития методов мониторинга растут и возможности исследований. Важность этой темы сохраняется постоянным возникновением природных и антропогенных явлений, часть из которых носит уникальный характер.

Таким уникальным событием является мощное взрывное извержение вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай произошедшее 15 января 2022 г. в 04:02 по всемирному координированному времени (UTC). Мощность этого взрывного извержения была близка к извержению вулкана Кракатау произошедшему в 1883 г.

Для изучения закономерностей возникновения и развития геосферных и межгеосферных процессов необходимо применять комплексные методы исследования с применением аппаратуры, позволяющей проводить измерения основных параметров геосфер с высокой точностью в широком частотном диапазоне.

Комплексные исследования, с применением множества разнообразных приборов, решают важнейшую задачу непрерывного мониторинга всех параметров



геосфер, включающего оперативную обработку, хранение и каталогизацию данных. Непрерывные ряды экспериментальных данных позволяют не только сформировать целостное представление о физических процессах в различных средах и выявить закономерности их зарождения и эволюции, но и изучить механизмы межгеосферного взаимодействия и передачи энергии между геосферами. Особым пунктом стоят опасные гео- и гидродинамические явления, в изучении которых непрерывный мониторинг среды их распространения необходим. Именно с помощью комплексного подхода, можно судить о причинах их возникновения, что может в дальнейшем помочь в вопросе прогнозирования и их предсказаний.

Представленные и описанные в данной главе лазерные деформографы и деформограф, расположенные на МЭС «м. Шульца», сети ГНСС-станций и уровнемерных станций позволили получить данные о состоянии геосфер, а также проанализировать и выявить характеристики геосферного и межгеосферного взаимодействия в период извержения вулкана.

## **Глава 2**

### **Регистрация атмосферных возмущений вызванных взрывными извержениями вулканов**

В данной главе рассматривается регистрация катастрофических природных явлений на примере мощного взрывного извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай произошедшего 15 января 2022 г. в 04:02 по всемирному координированному времени (UTC).

15 января 2022 г. в 04:02 UTC произошло мощное взрывное извержение вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай породившее мощные возмущения в различных геосферах Земли, в частности и в атмосфере. Интенсивности возникших атмосферных возмущений было достаточно, чтобы вызвать колебания Земной коры и дальних расстояниях от вулкана, в описываемом в данной главе случае, подобные колебания были зафиксированы с помощью лазерных деформографов на МЭС «м. Шульца».

Также в главе определены характеристики ионосферных возмущений, проведено сравнение полученных результатов с другими исследованиями.

Материалы, описанный в данной главе, опубликованы в работах [71-73].

#### **2.1. Описание ГНСС-комплекса. Состояние ионосферы. Обработка ГНСС-сигнала.**

##### **2.1.1. Описание ГНСС-комплекса**

Для выявления и анализа ионосферных возмущений, возникших в результате взрывного извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай, были задействованы данные наблюдений нескольких сетей двухчастотных ГНСС-приёмников,

охватывающих территорию Приморского края и прилегающих регионов. Для обработки и дальнейшего анализа использовались сигналы спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС, собранные за период с 11 по 20 января 2022 г. на 26 станциях глобальной ГНСС-сети IGS (7 станций находятся вблизи вулкана и 19 станций рассредоточены по направлению от вулкана до Приморского края), и 13 станциях, расположенных на территории Приморья. Дискретизация используемых данных составляет 30 секунд. Данные со станций входящих в сеть IGS были загружены из информационной системы данных о динамике земной коры CDDIS [74], координаты вулкана получены с сайта глобальной программы вулканизма Смитсоновского института [75]. Расположение всех используемых в настоящей работе ГНСС-станций относительно вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай показано на рисунке 2.1.

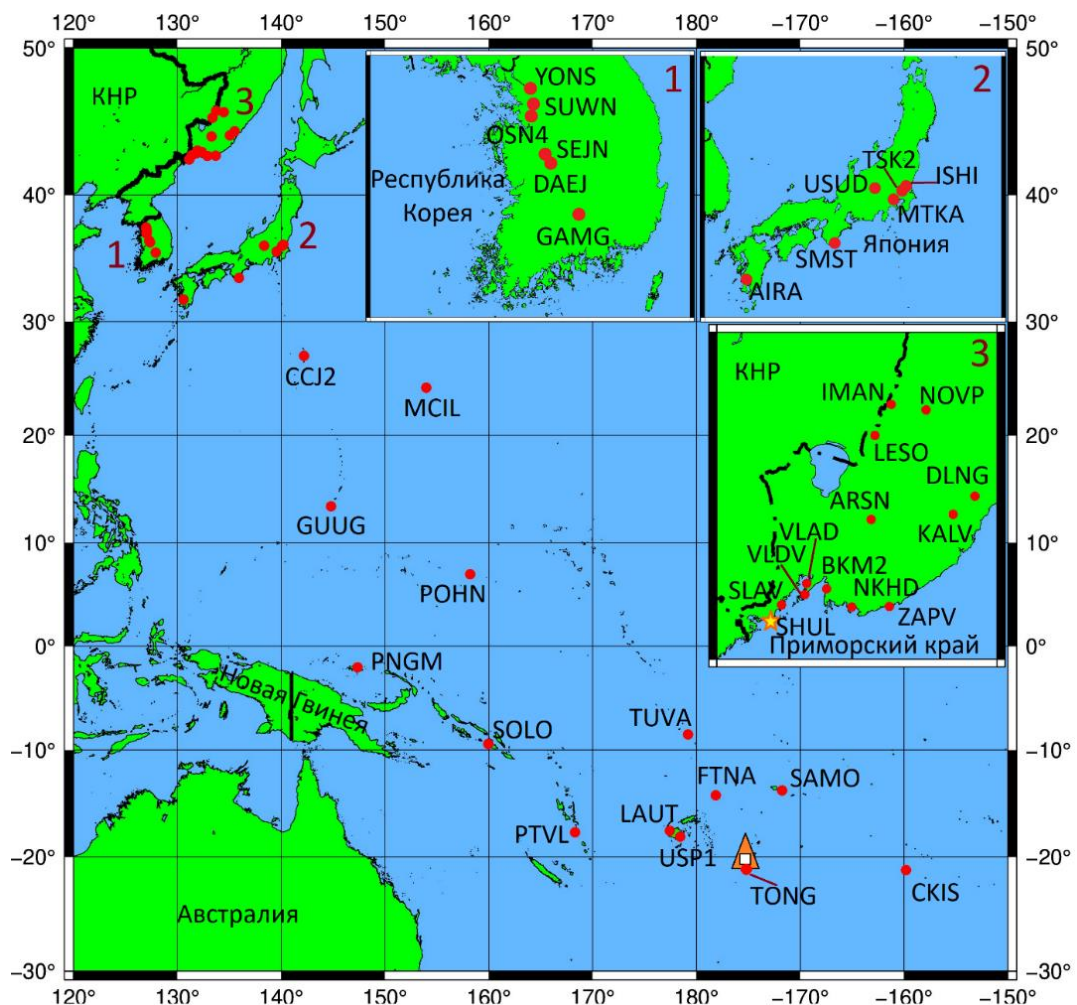


Рис. 2.1. Расположение ГНСС-станций относительно вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай. Вулкан расположен рядом с ГНСС-станцией TONG.

### 2.1.2. Состояние ионосферы

Геомагнитная активность существенно влияет на состояние ионосферы — чем выше индекс геомагнитной активности, тем интенсивнее происходят ионосферные колебания.

В период исследуемого вулканического события геомагнитная обстановка характеризовалась как возмущенная. На рисунке 2.2 представлен график изменения геомагнитного индекса  $K_p$ , который определяется на основе данных станций в средних широтах и даёт представление о планетарной геомагнитной обстановке с шагом в три часа. Из рисунка видно, что 14.01.2022 г. (незадолго до начала исследуемого эруптивного эпизода) началась умеренная геомагнитная буря, вызвавшая возмущения в ионосфере Земли, несвязанные с извержением вулкана и продолжавшиеся постепенно затухая до 21.01.2022 г.



Рис. 2.2. Состояние геомагнитной обстановки в исследуемый временной интервал по индексу  $K_p$  [76].

Высота слоя максимальной ионизации на момент извержения, необходимая для расчетов, была получена с использованием модели ионосферы IRI2016 [77] и принята равной 306 км. Это значение использовалось для анализа всех ГНСС-данных.

### 2.1.3. Обработка ГНСС-сигнала

Принцип обработки ГНСС-данных и выделения величины ТЕС описан в главе 1.

Значения «наклонного» полного электронного содержания (ТЕС) вдоль всех лучей станция-спутник были рассчитаны при помощи программного обеспечения *tec-suite* [78]. Ряды «наклонного» ТЕС были преобразованы в вариации «вертикальных» значений и профильтрованы в программном обеспечении *Viewtecs*, методом скользящего среднего в двух временных диапазонах: 1-10 мин и 10-60 мин, с целью выделения коротко- и длиннопериодных вариаций ТЕС (см. рис. 2.3, б и в соответственно). Более подробное описание использованной процедуры удаления тренда и фильтрации данных ТЕС можно найти в работах [17, 79, 80].

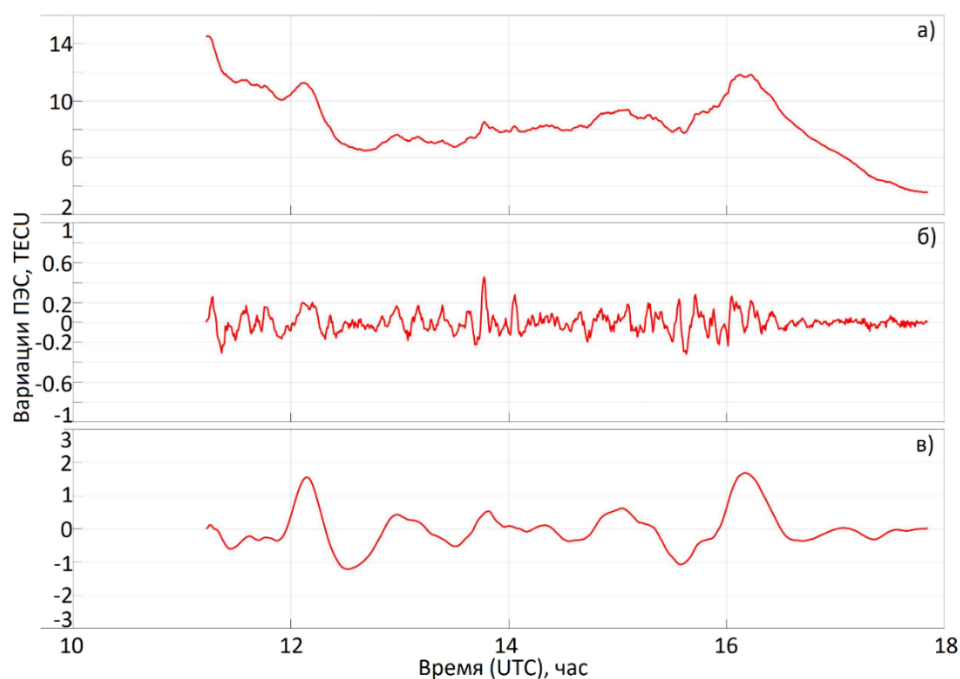


Рис. 2.3. Пример ряда вертикального ТЕС (а) и результатов его частотно-временной фильтрации для пары станция "IMAN" – спутник G17 (GPS) (б и в).

В период с 11 по 20 января 2022 года (по UTC) для каждой пары «станция – спутник» были сформированы ряды изменений VTEC. Данные предварительно



отфильтрованы в соответствующем частотно-временном диапазоне. За тот же временной интервал построены диаграммы «дальность – время», демонстрирующие динамику VTEC на расстояниях до 11 тыс. км от вулкана в направлении Приморского края.

## 2.2. Анализ полученных результатов ГНСС-данных.

Для выявления ионосферных возмущений, связанных с активностью вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай (ковулканических возмущений), а также для анализа фоновых вариаций ТЕС и их изменений до и после эруптивного эпизода, мы построили и проанализировали диаграммы «дальность – время» за период с 11 по 20 января 2022 года. В диапазоне периодов 1-10 мин на расстояниях свыше 9 тыс. км от вулкана возмущения не выявлены. Для периодов 10-60 мин на диаграммах за 15 января 2022 года зафиксированы интенсивные ковулканические вариации ТЕС, прослеживающиеся от вулкана на расстояния свыше 10 тыс. км (рисунок 2.4). На рисунке 2.5 представлены аналогичные диаграммы для двух дней до и после извержения.

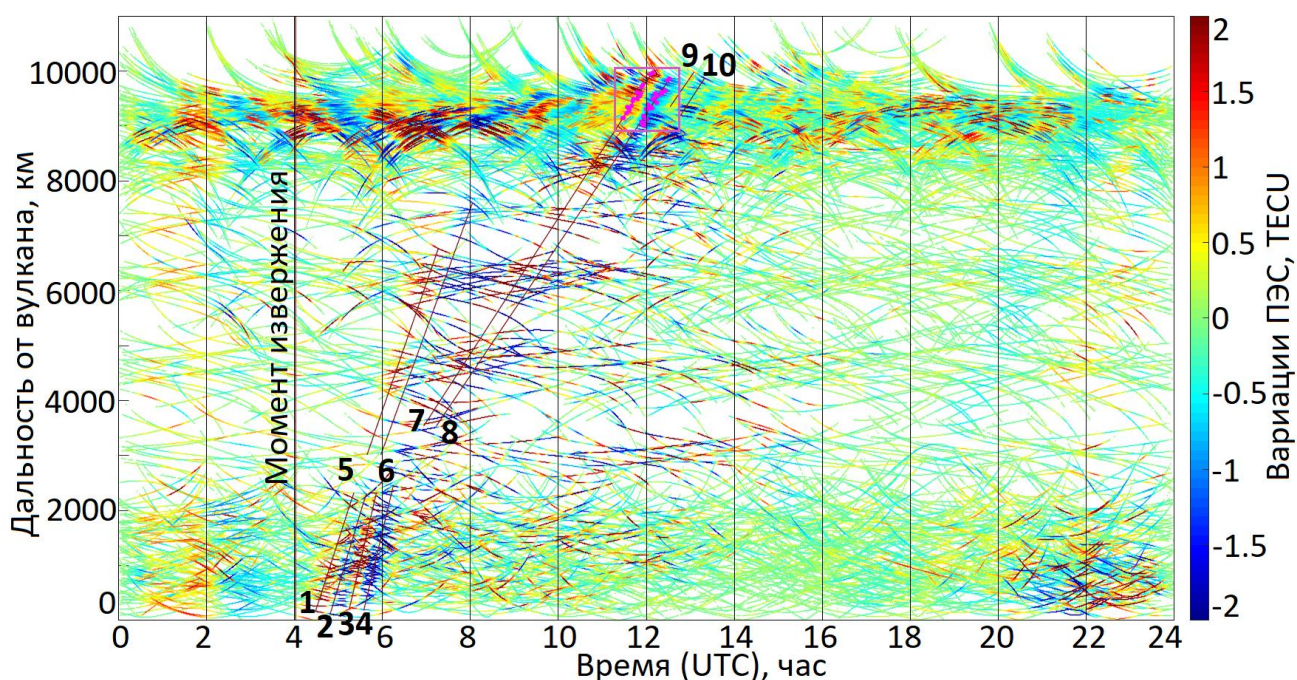


Рис. 2.4. Диаграмма дальность-время за 15.01.2022 г., построенная для периода фильтрации 10-60 мин.



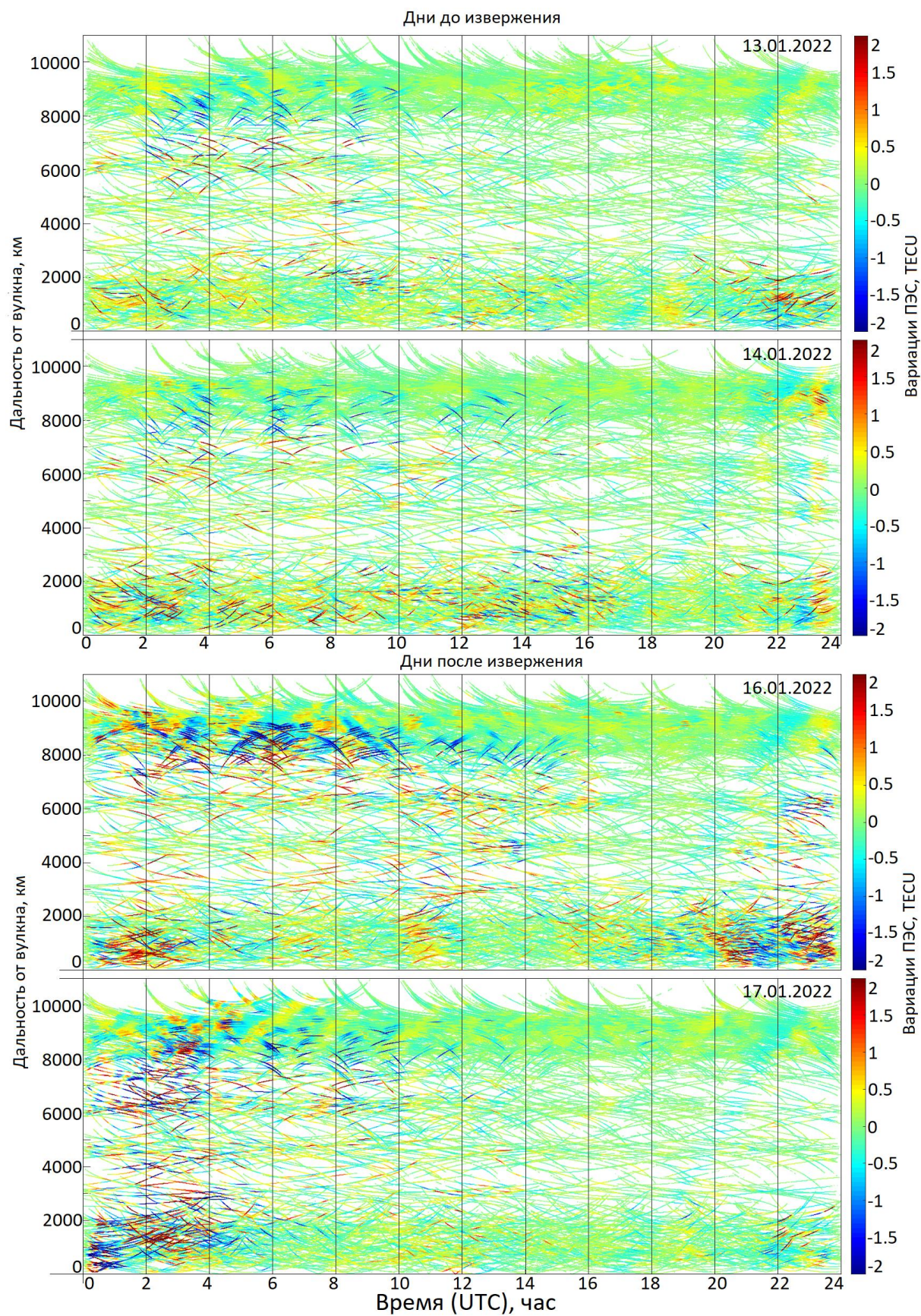


Рис. 2.5. Диаграммы дальность-время за 13-14 и 16-17 января 2022 г. Период фильтрации данных 10-60 мин.

Из рис. 2.4 видно, что интенсивные перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИНВ), начало регистрации которых относится примерно к 04:10 и далее наблюдаемые между четырьмя и шестью часами по всемирному времени, являются следствием извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай. Такие вариации отсутствуют в дни до и после него (рис. 2.5). Эти возмущения, распространяясь от вулкана, разделились на расстоянии около 3 тыс. км на две моды: первая (быстрая) прослеживается примерно до 8 тыс. км, а вторая (медленная) распространялась значительно дальше до 10-11 тыс. км.

В таблице 2.1 приведены оценки значений скоростей распространения, выделенных нами на рис. 2.4 ко вулканических возмущений VTEC. ПИНВ 1-4, характеризующиеся средними скоростями от  $\sim 720$  до  $\sim 950$  м/с, распространялись до расстояний 2.5-3 тыс. км в течение примерно 3 часов после извержения. Аналогичные результаты приводятся в работах [81, 82]. Полученные скорости соответствуют акустической моде, которая порождается ударными волнами в нижней атмосфере Земли, часто возникающими при сильных эксплозиях (взрывах). На расстоянии около 3 тыс. км от вулкана эти возмущения разделяются на две моды: первая мода распространяется до расстояний 7-8 тыс. км от вулкана с несколько меньшей средней скоростью  $\sim 630$  м/с (ПИНВ 5-6), вторая мода, регистрируемая на значительно больших расстояниях, в том числе и над Приморьем, имеет скорость порядка 340 м/с (ПИНВ 7-8) и отождествляется рядом авторов с волнами Лэмба [81-85]. Явление разделения возмущений VTEC на удалении от породившего их источника уже ранее наблюдалось для сильных землетрясений и описано в работах [86, 87]. Выделяющиеся в дальней зоне ПИНВ 9-10, распространяющиеся со средней скоростью  $\sim 330$  м/с также могут быть ассоциированы с ко вулканическими аномалиями TEC, т.к. не наблюдаются в предшествующие извержению и последующие дни.



Таблица 2.1. Оценки скоростей распространения ковулканических возмущений ТЕС по диаграмме дальность-время, обозначенных цифрами 1-10 на рис. 2.4

Номер возмущения	Скорость (средняя скорость)
1-2	690-750 (~720) м/с
3-4	940-950 (~950) м/с
5-6	610-640 (~630) м/с
7-8	320-360 (~340) м/с
9-10	320-340 (~330) м/с

На рис. 2.6 приведены примеры вариаций ТЕС, зарегистрированные в день извержения на двух станциях, расположенных в Приморском крае (дальняя зона относительно вулкана). Также даны изменения ТЕС за день до и после него. Из рисунка видно, что в день извержения наблюдаются интенсивные колебания VТЕС с амплитудами 0.5-1.4 TECU, которые отсутствуют в другие дни. Чтобы убедиться в том, что эти колебания, действительно, обусловлены извержением, а также отождествить их с соответствующими фронтами ПИВ, визуально выделяющимися на диаграмме дальность-время на расстояниях 9-10 тыс. км от вулкана (рис. 2.4), среди этих вариаций были выделены первые четко читающиеся максимумы и минимумы (обозначены, соответственно, красными и синими стрелками на рис. 2.6). Координаты соответствующих им ионосферных точек (точки, в которых лучи приемник-спутник пересекают слой максимальной ионизации) показаны на рис. 2.4 пурпурными кружками и в крупном масштабе даны на рис. 2.7.

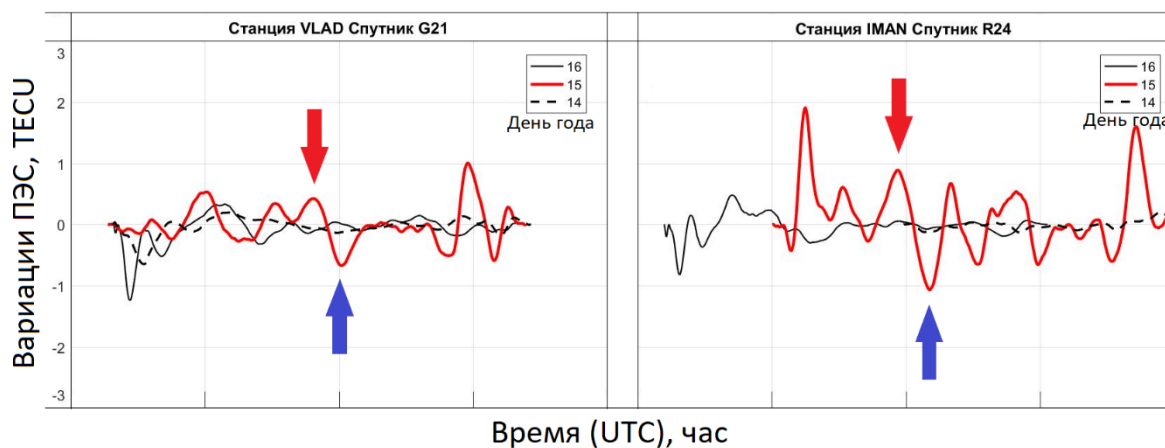


Рис. 2.6. Примеры вариаций ТЕС за период 14-16 января 2022г. Диапазон фильтрации 10-60 мин.

Средняя амплитуда обнаруженных над территорией Приморского края ковулканических возмущений ТЕС составила  $\sim 1.0$  TECU.

Средний период и длина волны этих возмущений, были определены по расстоянию между положением максимумов и минимумов, расположенных на одинаковом удалении от вулкана и показанных на соответствующей диаграмме дальность-время (рис. 2.7). Полупериод обнаруженных возмущений составил  $\sim 28$  мин, а половина длины волны  $\sim 580$  км (соответственно, период и длина волны составили  $\sim 57$  мин и  $\sim 1160$  км). Полученные нами величины отличаются от значений аналогичных параметров полученных для дальней зон в работе [81], где период составил  $\sim 10-25$  мин, а длина волны  $\sim 250-500$  км, и статье [82], где период составил  $\sim 10-30$  мин, а длина волны  $500-1000$  км. В работе [88], исследующей распространение возмущений над территорией Японии, оценка длины волны (относящаяся к первому приходу возмущений) составила  $\sim 400$  км.

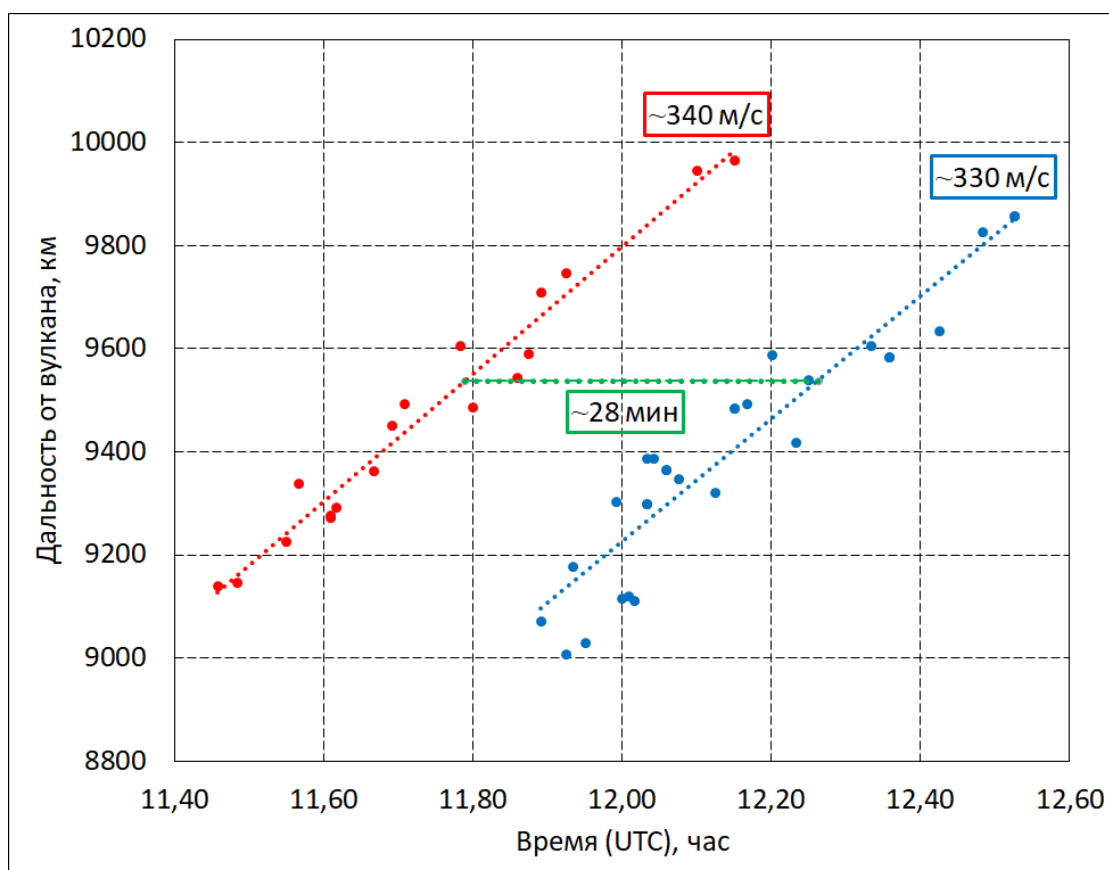


Рис. 2.7. Определение полупериода и длины волны ковулканических возмущений ТЕС в дальней относительно вулкана зоне.

### 2.3. Регистрация атмосферных возмущений лазерным интерферометрическим комплексом

Характеристики ковулканических ионосферных возмущений над Приморским краем, полученные на основе ГНСС-наблюдений, сопоставлены с данными высокоточных измерительных приборов: лазерного нанобарографа (НБ) и двух лазерных деформографов (ДФ), ориентированных по осям "север – юг" и "восток – запад". Все три прибора расположены на территории МЭС «м. Шульца» в пределах 100 метров от ГНСС-станции SHUL (на рис. 2.1 расположение оборудования соответствует обозначению ГНСС-станции SHUL). Для сопоставления с рядами вариаций VTEC данные НБ и ДФ были разрежены до 30 секунд и профильтрованы в том же диапазоне периодов что и данные ТЕС

полосовым фильтром Хемминга. Используемая процедура дает результаты аналогичные использованному для анализа данных ТЕС методу скользящего среднего. На рис. 2.8 представлены полученные после увеличения шага дискретизации данных и фильтрации вариации атмосферного давления по записям нанобарографа и смещений земной поверхности по данным деформографов.

Описание используемой аппаратуры приведено в Главе 1.

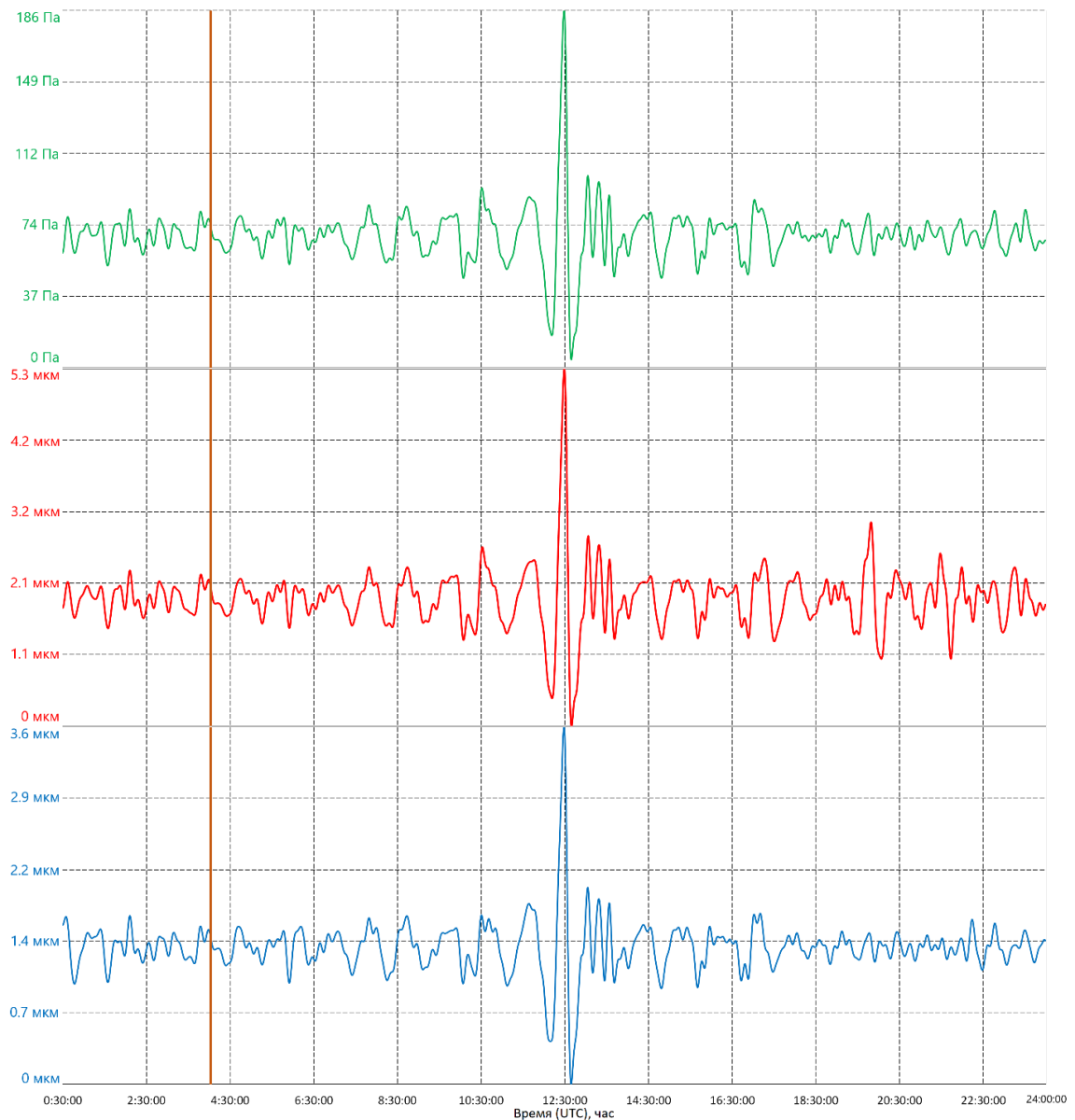


Рис. 2.8. Фрагменты записи НБ и ДФ за 15 января 2022 г. Диапазон фильтрации 10-60 мин.

Из рис. 2.8 видно, что наиболее интенсивные возмущения, вызванные извержением вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай, наблюдались в период с 12:10:00 UTC до 14:00:00 UTC [89]. Записи всех трех инструментов фиксируют практически синхронные изменения приземного давления и колебаний земной поверхности, что говорит о том, что последние были инициированы распространением возмущения в нижнем слое атмосферы (тропосфере). Максимум возмущений наблюдался в ~12:29:00 UTC, а минимум в ~12:39:00 UTC. Максимумы и минимумы изменений VTEC, зафиксированные по ГНСС-данным в ближайших к мысу Шульца ионосферных точках (рис. 2.9), наблюдались в ~11:40:00 UTC и ~12:07:30 UTC, т.е. значительно ранее возмущений, зафиксированных НБ и ДФ. Разность моментов фиксации возмущений в тропосфере и ионосфере для максимума составила ~50 мин, для минимума ~30 мин. Эффект опережающего прихода ионосферных возмущений отмечают и другие исследователи. В работе [84] разность моментов фиксации возмущений ТЕС и приземного давления воздуха на территории Японии составила ~40 мин. В работе [88], рассматривающей тот же регион, ~30 мин, а в работе [85] первые ионосферные возмущения фиксируются до фиксации возмущений в тропосфере. В статье [83] авторы получили разность моментов фиксации возмущений равной ~40 мин.

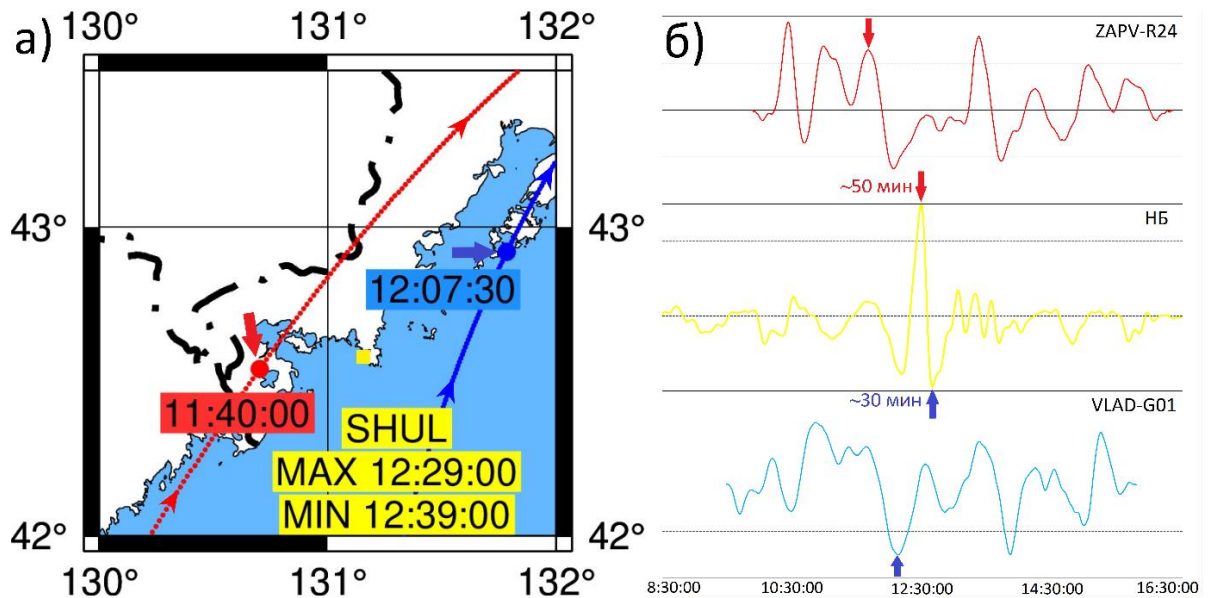


Рис. 2.9. Положение моментов фиксации пиков возмущений (а) и сравнение моментов фиксации по ГНСС-данным и данным НБ (б).

Обнаруженный эффект, на первый взгляд, противоречит предположению о том, что распространяющиеся в нижней тропосфере Земли возмущения (волны Лэмба), являются источником выявленных в дальней зоне ПИВ, т.к. они регистрируются значительно позже интенсивных возмущений в ионосфере. Однако, в работах [83-85; 88] обнаружен второй приход ПИВ, время регистрации которых вполне соотносится с зафиксированными также и нами достаточно слабыми возмущениями 9-10 (рис. 2.4), наблюдаемыми уже после регистрации аномалий нанобарографом и деформографами и, возможно, инициированными именно тропосферными возмущениями.

Объяснение явления ранней регистрации в дальней зоне интенсивных ПИВ 7-8 по отношению к возмущениям приземного давления воздуха и колебаний земной поверхности (рис. 2.4) вулканического происхождения может быть связано с тем, что в атмосфере распространялись два независимых друг от друга возмущения, источниками которых явилось извержение вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай. Первое возмущение распространялось в тропосфере Земли со скоростью близкой к скорости распространения звука порядка 320 м/с

(зарегистрировано НБ и ДФ), второе, поднявшись вертикально вверх над вулканом, распространялось в ионосфере с большей скоростью порядка 340 м/с (зарегистрировано по ГНСС-данным и на ~6% больше скорости возмущений, зафиксированных в тропосфере).

Другое объяснение может быть связано с эффектом «опережающих ионосферных возмущений», ранее зафиксированных во время цунами, порожденного Суматра-Андаманским землетрясением 26.12.2004 г. с магнитудой Mw 9.1, где ионосферные возмущения распространялись со скоростью ~650 м/с, опередив приход цунами на ~90 мин [90]. Возникновение таких возмущений объясняется на основе диссипации поперечной моды акустико-гравитационных волн, т.к. фронт тропосферных возмущений генерирует распространяющуюся вверх и вперед волну возмущений, достигающую высот ионосферы. Возможно, именно данный механизм объясняет обнаруженный нами и другими исследователями эффект опережающего распространения вариаций ТЕС в дальней относительно источника зоне. Для разрешения этого вопроса требуется выполнение отдельных исследований и математического моделирования полученных данных.

Также следует отметить, что на рис. 2.4-2.5 выделяется ряд достаточно интенсивных аномалий VТЕС сложной структуры, природа которых на данный момент не ясна. Речь идет об ионосферных возмущениях наблюдавшихся на расстояниях 8-10 тыс. км от вулкана 15.02.2022 г. в промежутках времени 00-12 и 15-22 часа UTC (рис. 2.4), а также подобные им возмущения, затухающие к 15 часам следующего после извержения дня. Изменяющее свою интенсивность "пятно" вариаций ТЕС также выявляется в промежутках между 00-04 и 20-24 часами в ближней к вулкану зоне (до 2000 км) в течение 13-17 января (рис. 2.4-2.5). Наиболее вероятно, эти явления связаны с какими-то долгоживущими образованиями в ионосфере Земли. Однако, на диаграммах дальность-время видно, что интенсивность этих аномалий в день извержения и спустя сутки после него заметно усилилась, что также может быть связано с извержением вулкана.

## 2.4. Выводы к главе

По ГНСС-данным были получены характеристики ионосферных возмущений над Приморским краем, а также получена динамика распространения ионосферных возмущений от вулкана на расстоянии  $\sim 11000$  км в направлении к Приморскому краю. Значения периода и длины волны в близких к друг другу регионах полученные в нашей работе и в работах других авторов не совпали, что может быть вызвано разными методами обработки данных или ошибкой в названии параметра, так в одной работе (опираясь на иллюстрации) названный авторами период длины волны является полупериодом.

Было проведено сравнение полученных данных разного оборудования. Обнаружен эффект ранней фиксации ионосферных возмущений.

С использованием двух лазерных деформографов и лазерного нанобарографа удалось установить, что прихода возмущений от вулкана до МЭС «м. Шульца» не обнаружено. Были приблизительно одновременно обнаружены атмосферные возмущения, зафиксированные на записях нанобарографа и деформографов. Это говорит о том, что колебания атмосферы вызывали колебания Земной коры.



## **Глава 3**

### **Регистрация метеоцунами морскими уровнемерными станциями Тихого океана и Японского моря**

В главе описывается регистрация метеоцунами возникшего в результате мощного взрывного извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай произошедшего 15 января 2022 г. в 04:02 UTC.

Мощное взрывное извержение вулкана спровоцировало мощные атмосферные колебания. Они, в свою очередь, привели к возникновению метеоцунами в акваториях Тихого океана и Японского моря.

Материал, описанный в данной главе, опубликован в работе [91-92].

#### **3.1. Уровнемерные станции**

Колебания уровня моря зарегистрированы сетью уровнемерных станций в акваториях Тихого океана и Японского моря. Схема размещения станций представлена на рисунке 3.1. Основная часть измерительных устройств использует платформы AANDERAA и Valeport с погрешностью  $\pm 0,2\%$  от диапазона измерений. Данные и информация о станциях сайтов [93, 94].

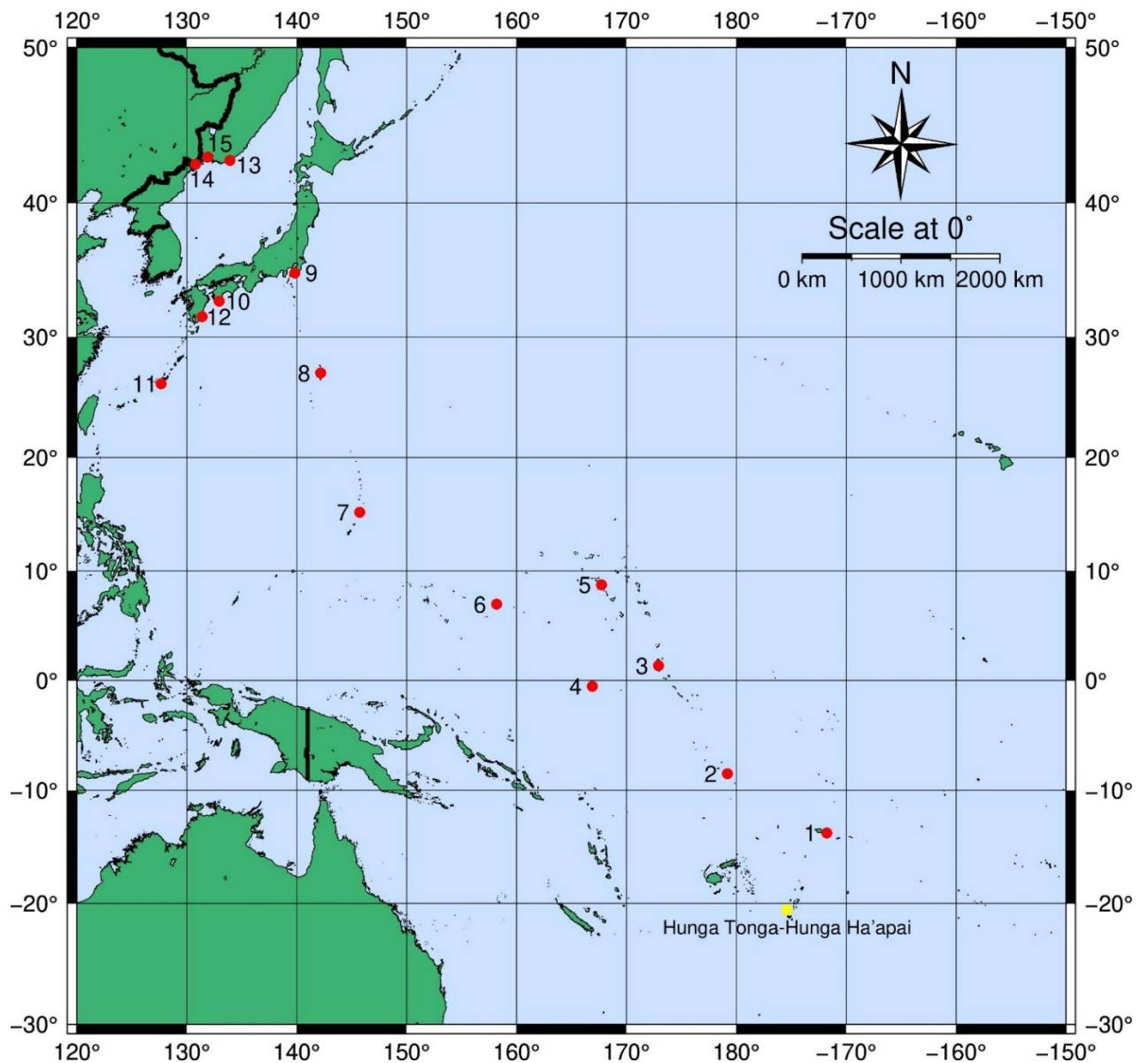


Рис. 3.1. Уровнемерные станции Тихого океана и Японского моря. 1 – Apia Upolu WS, 2 – Fongafale, 3 – Betio Tarawa, 4 – Nauru, 5 – Kwajalein, 6 – Dekehtik Pohnpei, 7 – Saipan, 8 – Chichijima, 9 – Mera, 10 – Tosashimizu, 11 – Naha, 12 – Aburatsu, 13 – Preobrazhenije, 14 – Pos'et, 15 – Vladivostok.

### 3.2. Регистрация метеоцунами

На рисунках 3.2-3.16 показаны фрагменты записей морских уровнемерных станций, обозначенных цифрами 1-15 на рисунке 3.1. На представленных графиках показаны данные на день извержения, и за день до извержения.

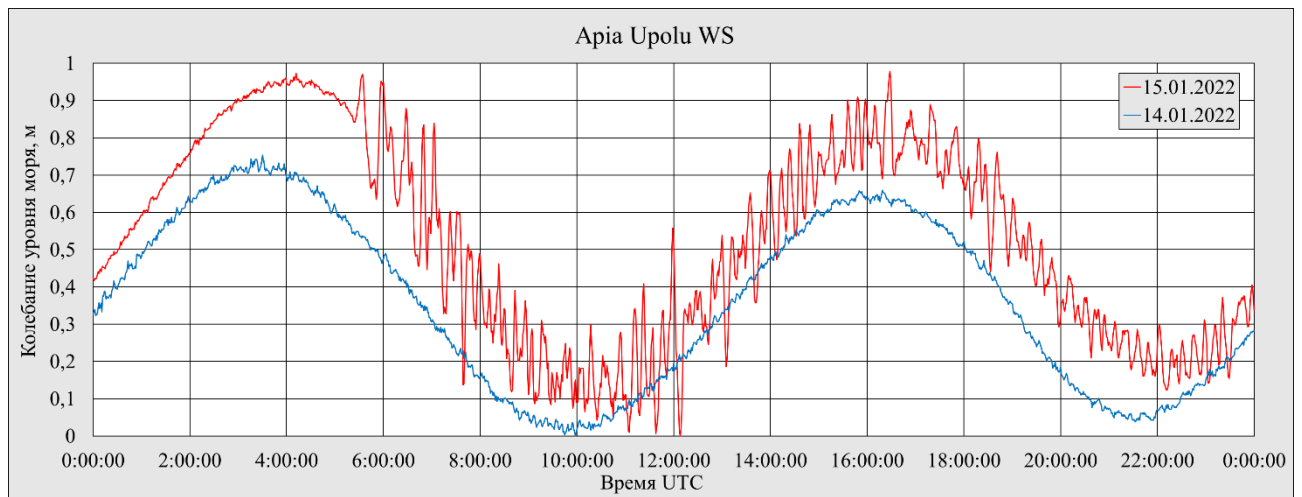


Рис. 3.2. Фрагмент записи уровнемерной станции Apia Upolu WS.

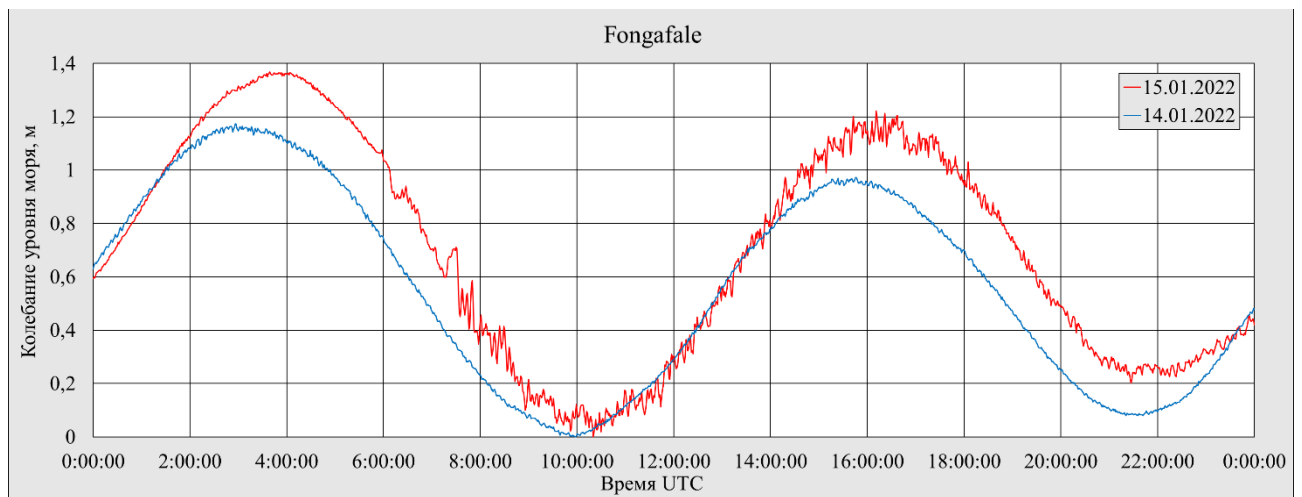


Рис. 3.3. Фрагмент записи уровнемерной станции Fongafale.

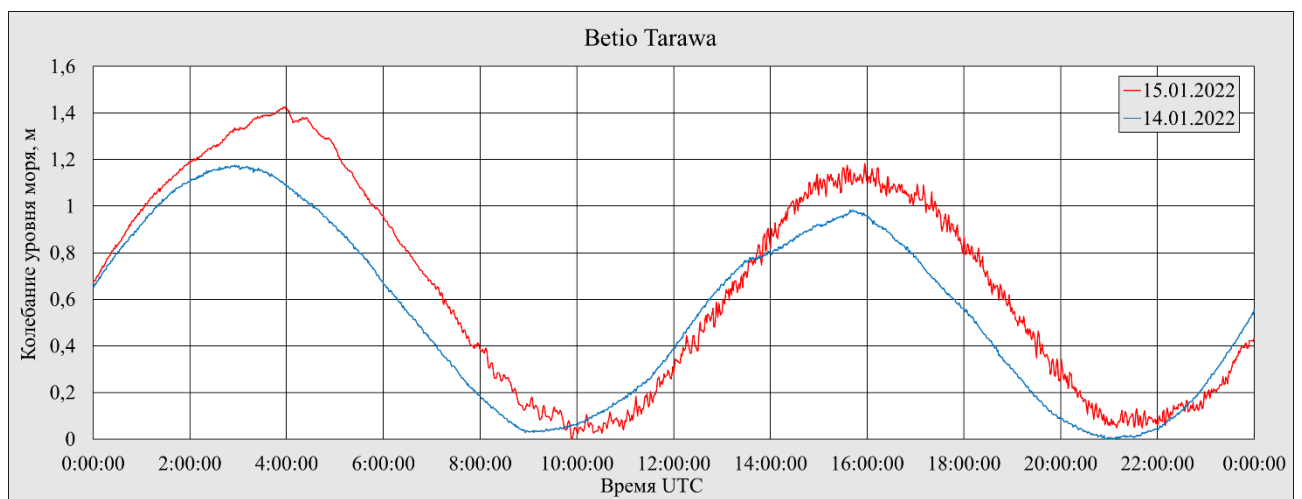


Рис. 3.4. Фрагмент записи уровнемерной станции Betio Tarawa.

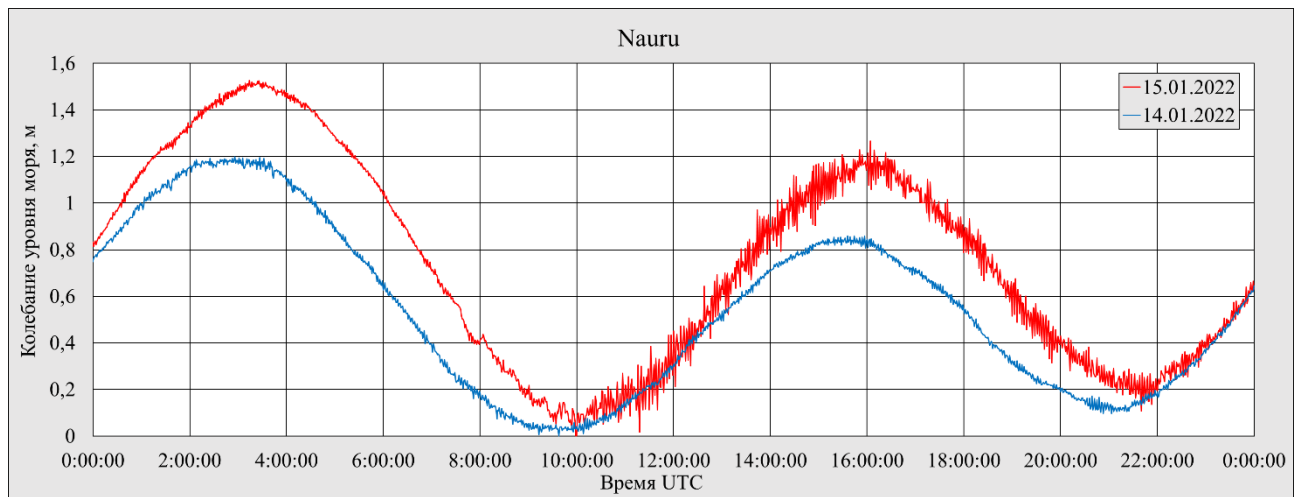


Рис. 3.5. Фрагмент записи уровнемерной станции Nauru.

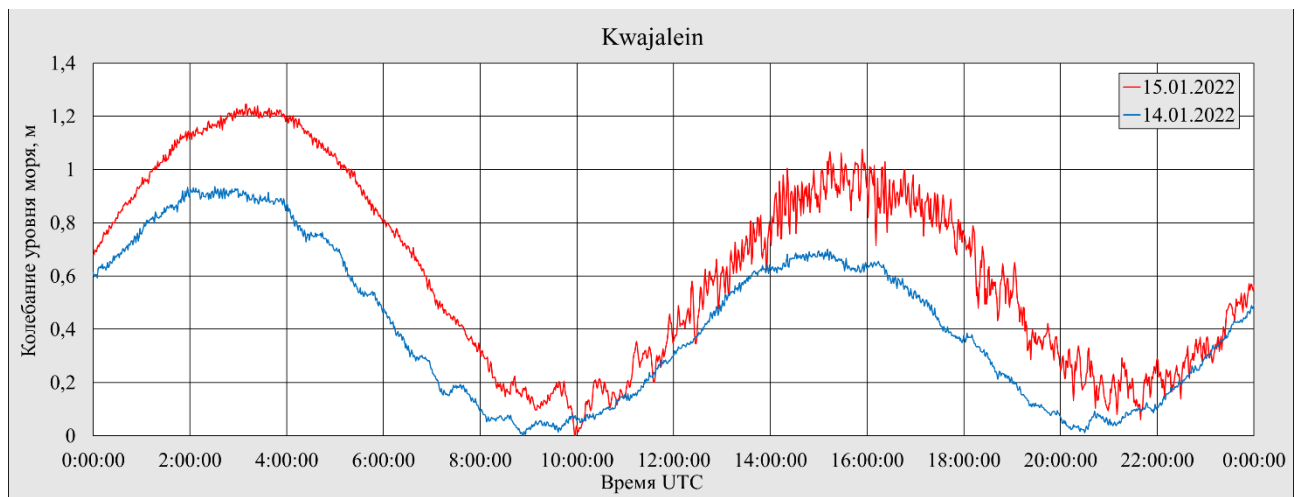


Рис. 3.6. Фрагмент записи уровнемерной станции Kwajalein.

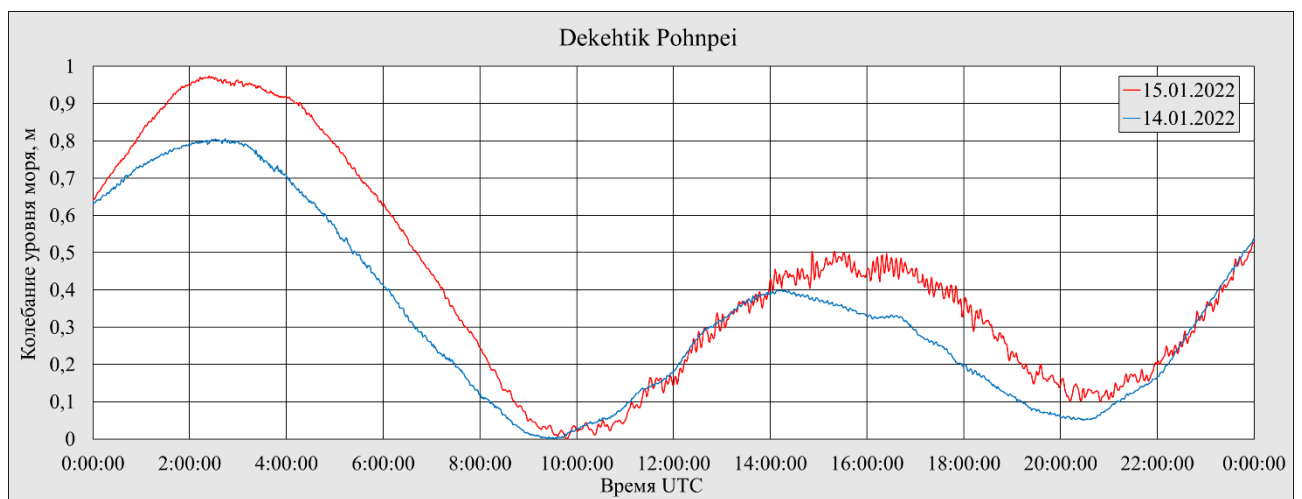


Рис. 3.7. Фрагмент записи уровнемерной станции Dekehtik Pohnpei.

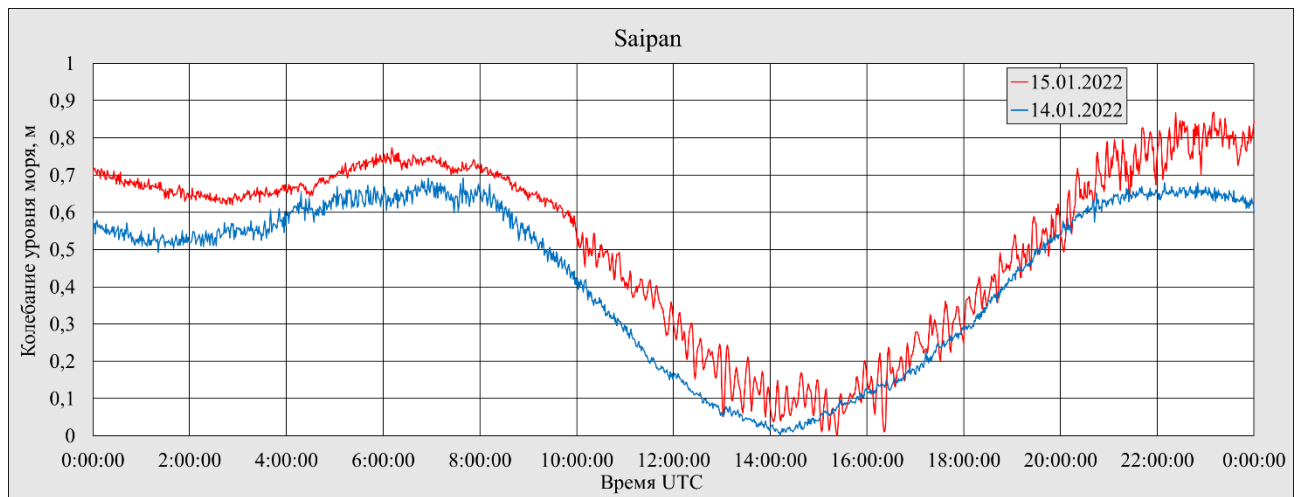


Рис. 3.8. Фрагмент записи уровнемерной станции Saipan.

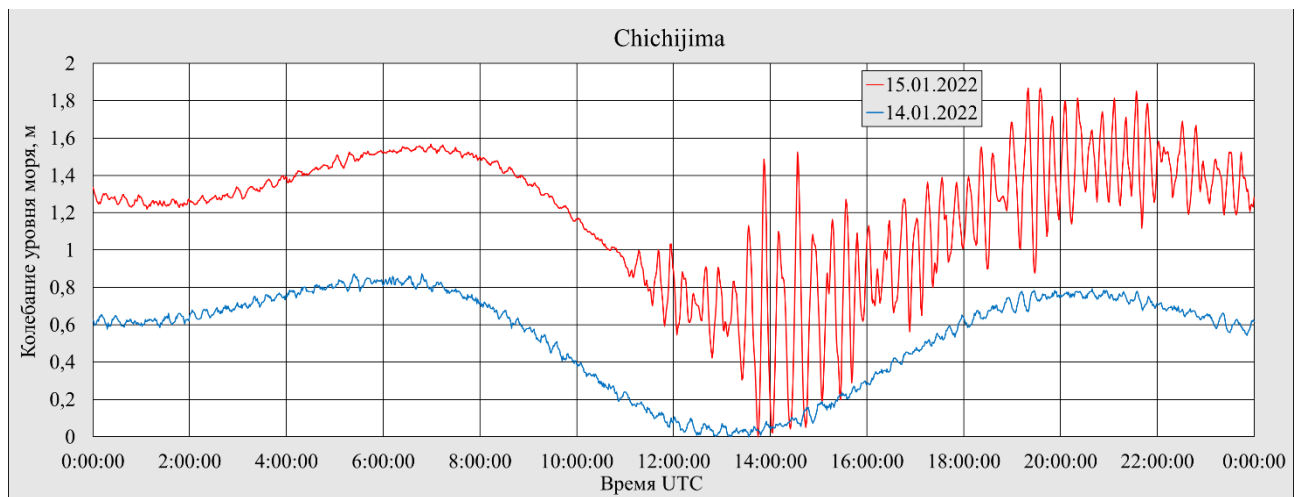


Рис. 3.9. Фрагмент записи уровнемерной станции Chichijima.

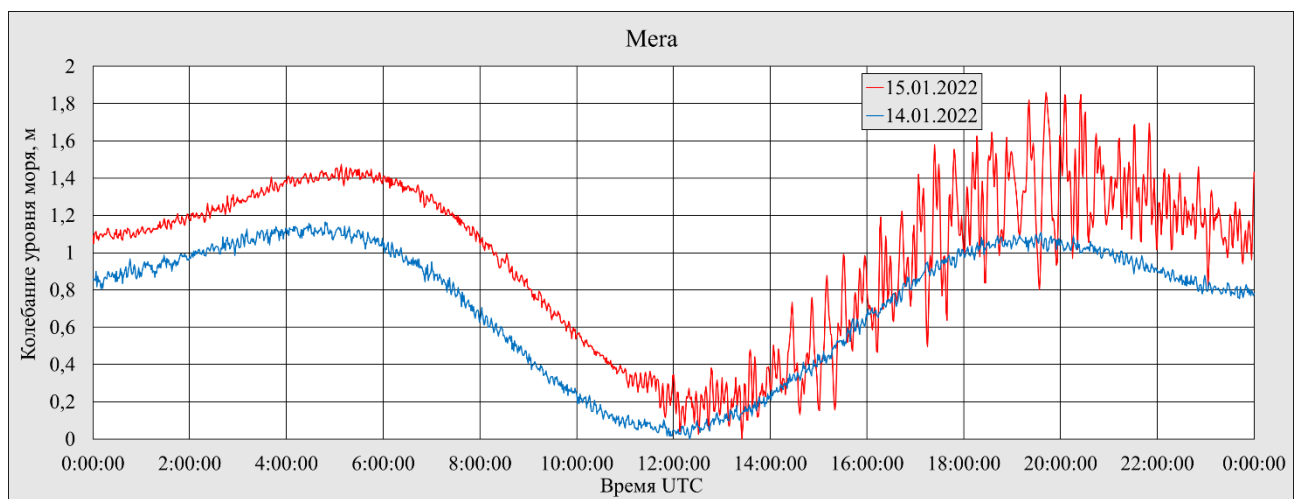


Рис. 3.10. Фрагмент записи уровнемерной станции Mera.

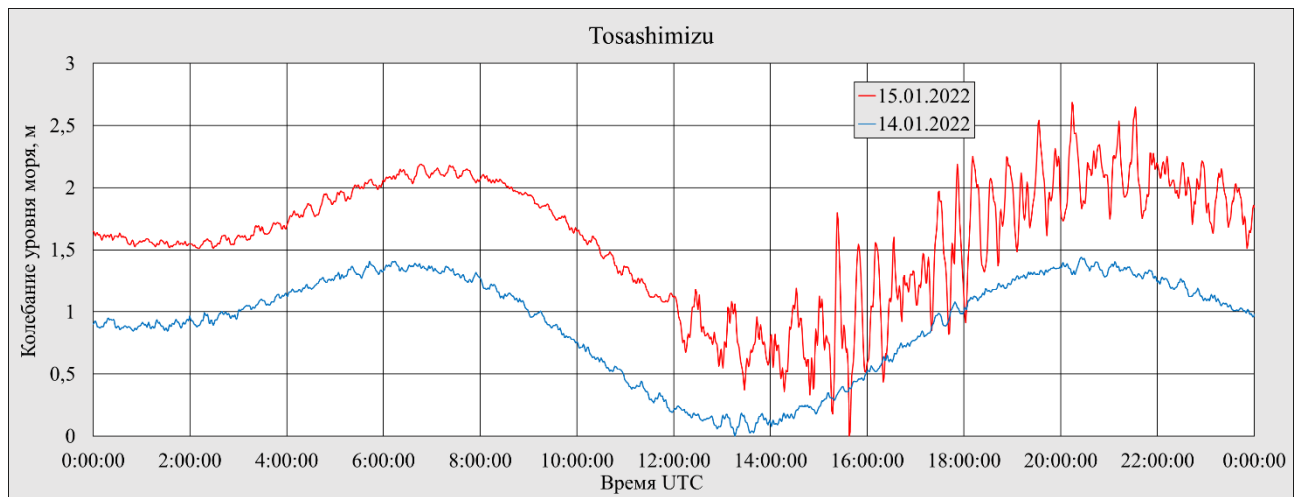


Рис. 3.11. Фрагмент записи уровнемерной станции Tosashimizu.

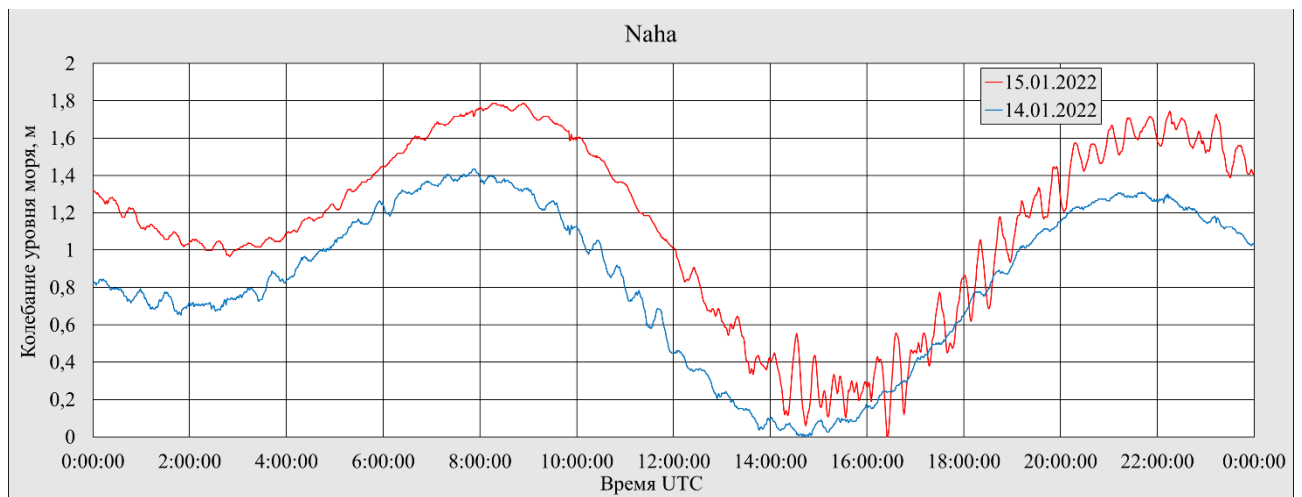


Рис. 3.12. Фрагмент записи уровнемерной станции Naha.

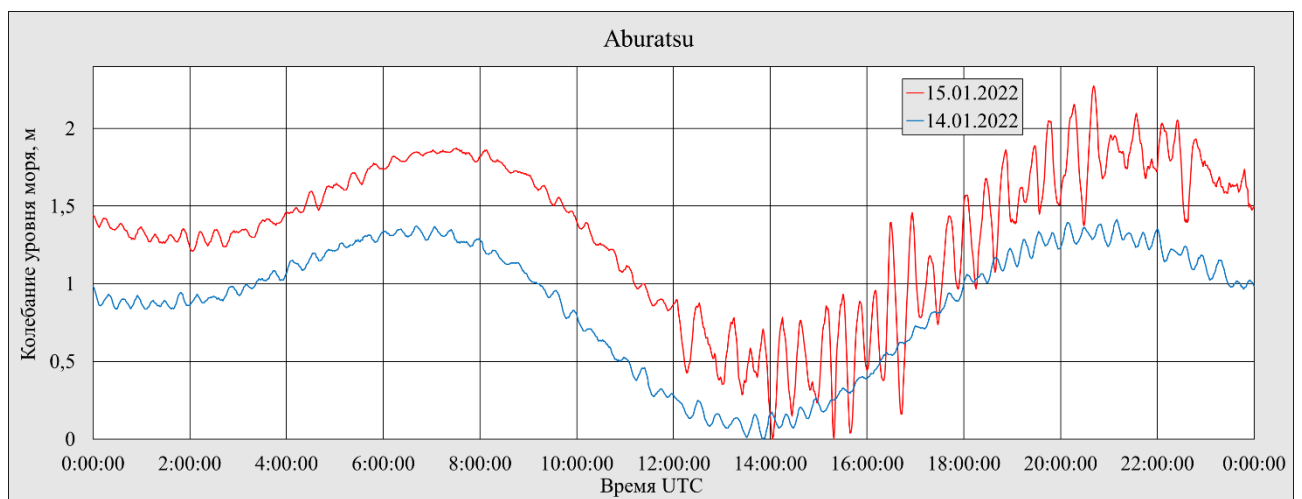


Рис. 3.13. Фрагмент записи уровнемерной станции Aburatsu.

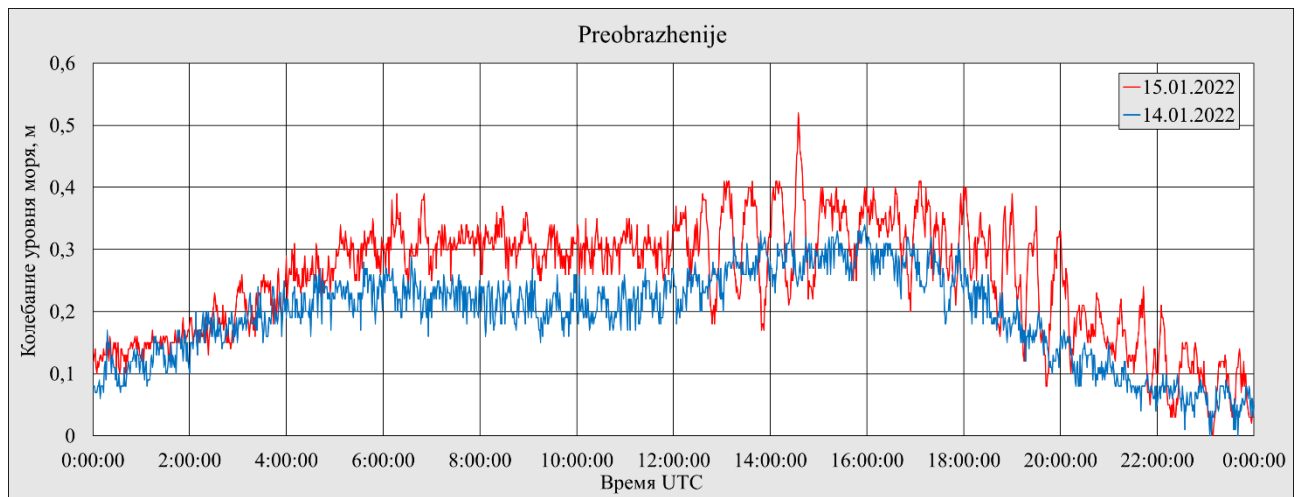


Рис. 3.14. Фрагмент записи уровнемерной станции Preobrazhenije.

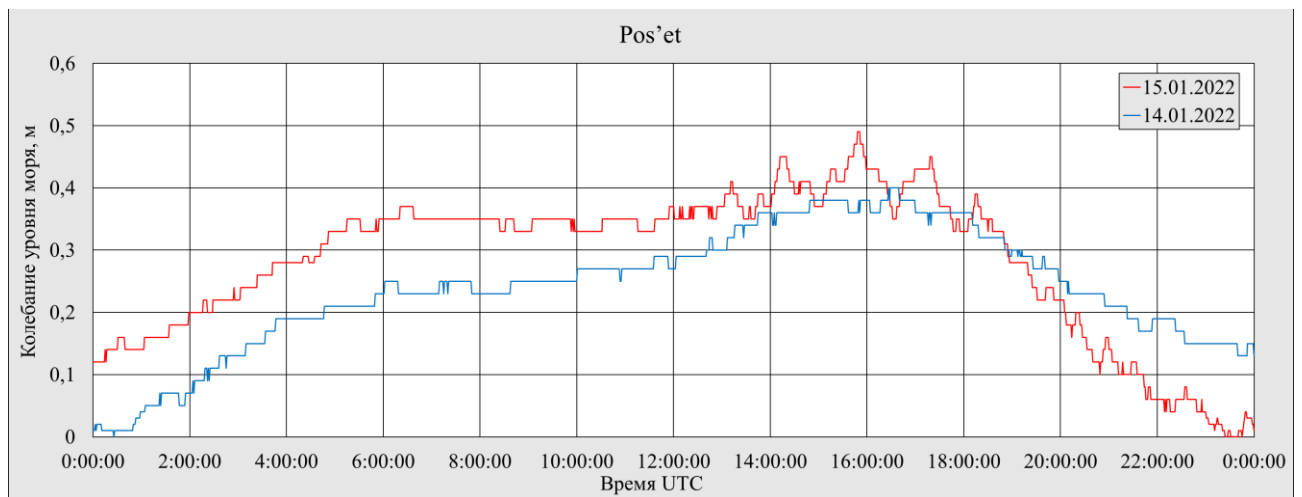


Рис. 3.15. Фрагмент записи уровнемерной станции Pos'et.

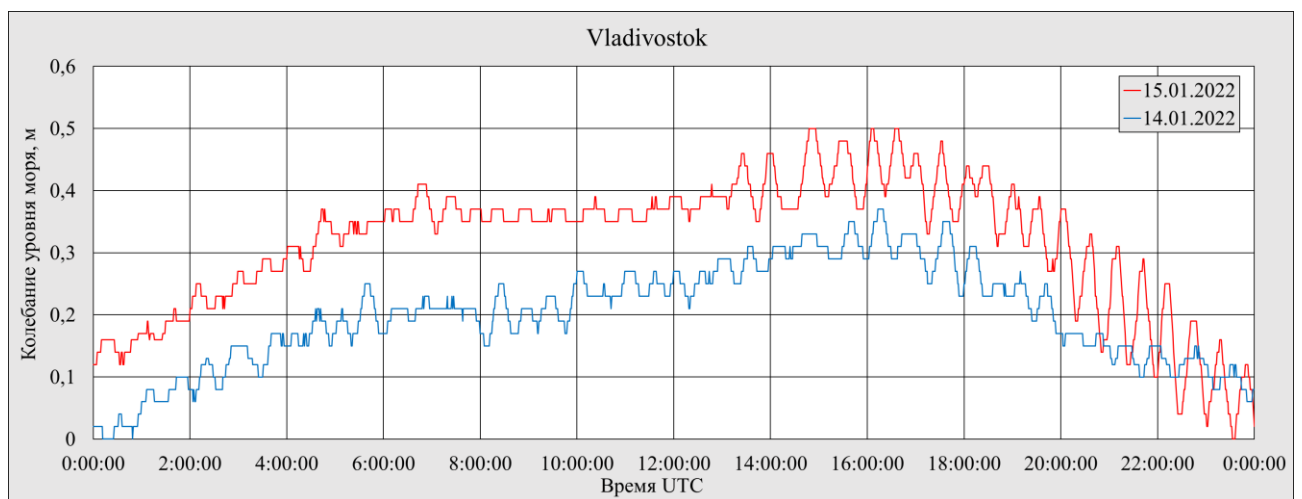


Рис. 3.16. Фрагмент записи уровнемерной станции Vladivostok.

На записях, представленных на рисунках 3.2-3.16, начало всех возмущений совпадает по времени с приходом атмосферного возмущения, вызванного взрывом вулкана [95]. Скорость распространения этого возмущения приблизительно соответствует скорости звука в воздухе. В исследованиях [96, 97] отмечается, что станции одновременно зафиксировали цунами, порождённое извержением.

На рисунках 3.17-3.31 показаны графики спектра фрагментов записей уровнемерных станций. Спектром сигнала назван спектр, построенный по данным записей, полученных в день извержения вулкана; спектр фона построен по данным записей, выполненных в спокойное время.

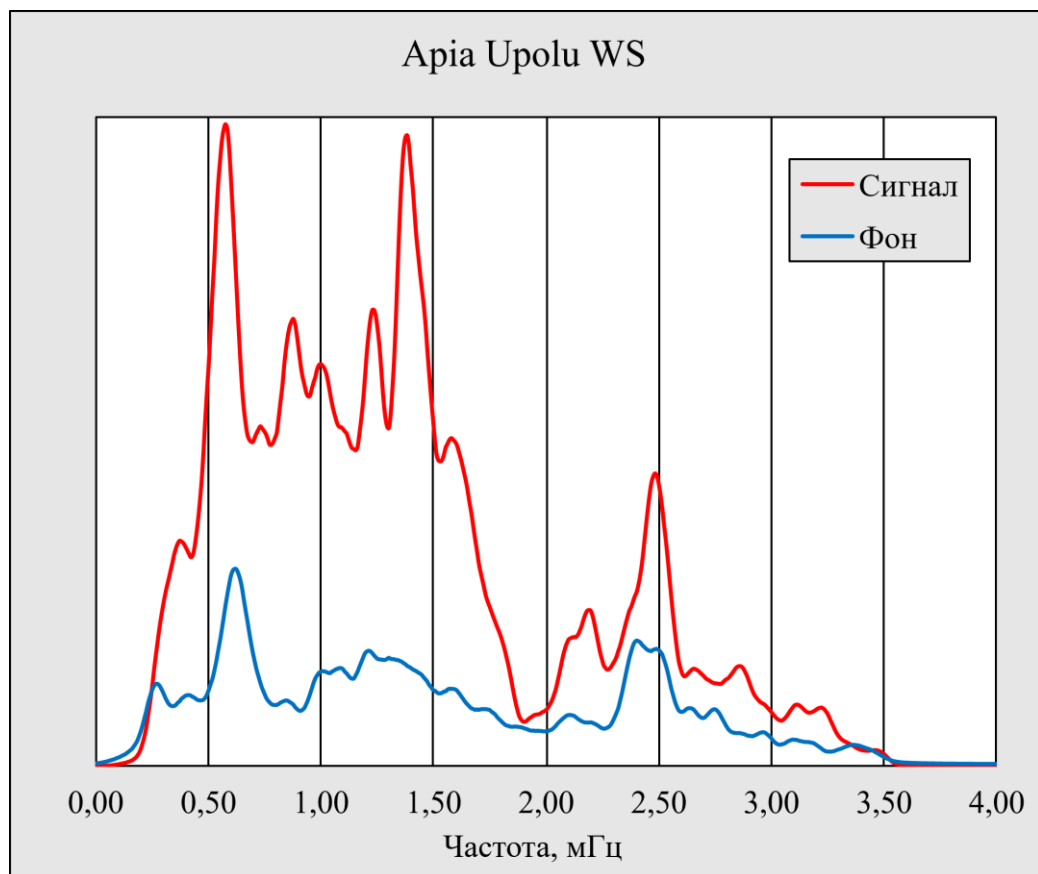


Рис. 3.17. Спектр записи уровнемерной станции Apia Upolu WS.



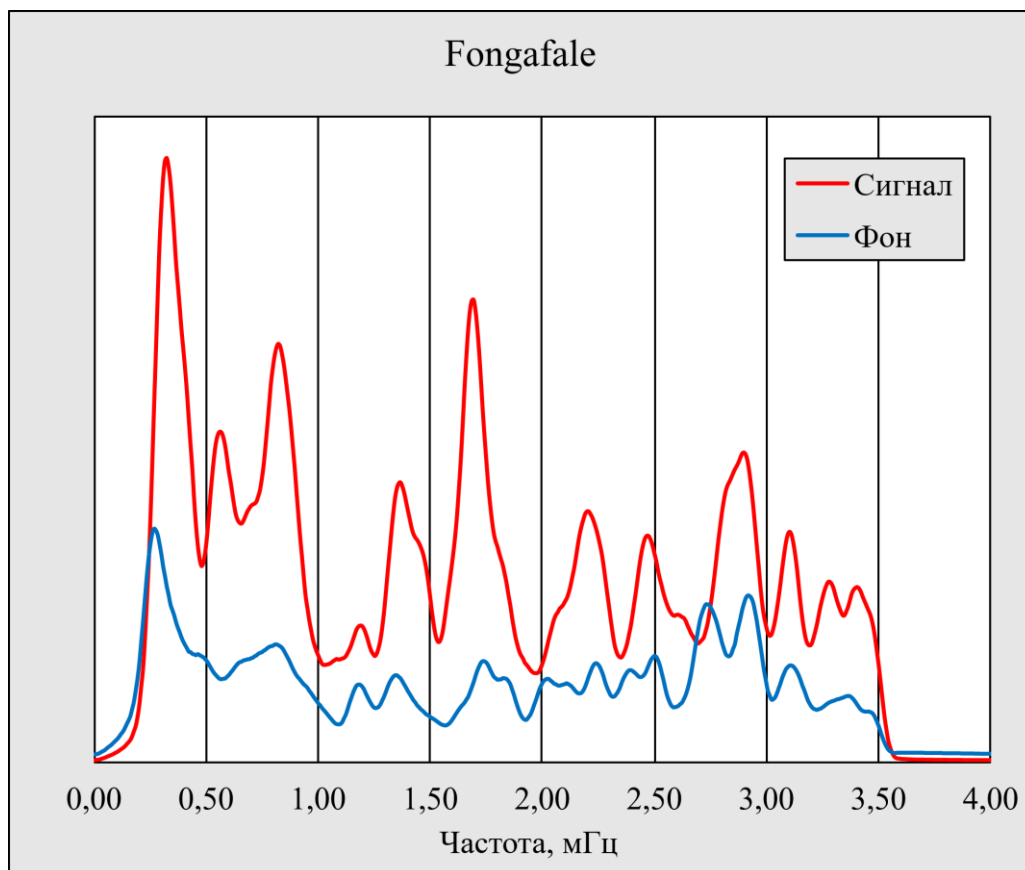


Рис. 3.18. Фрагмент записи уровневой станции Fongafale.

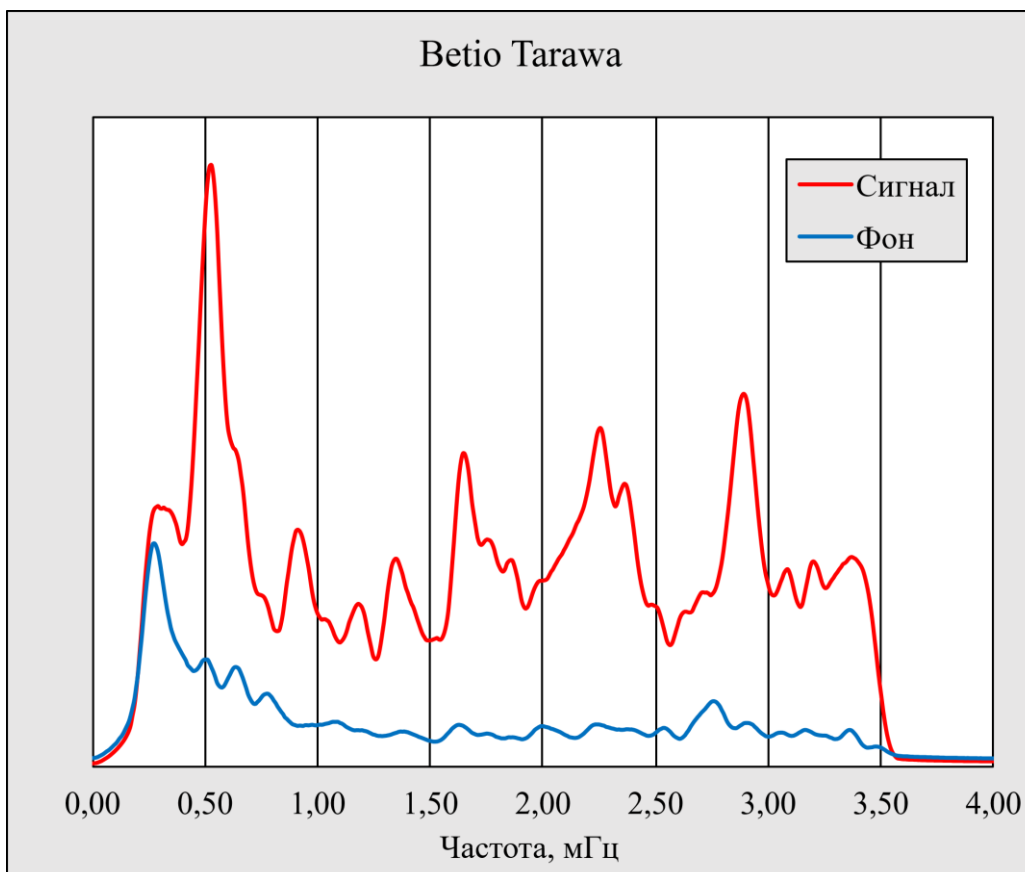


Рис. 3.19. Фрагмент записи уровневой станции Betio Tarawa.

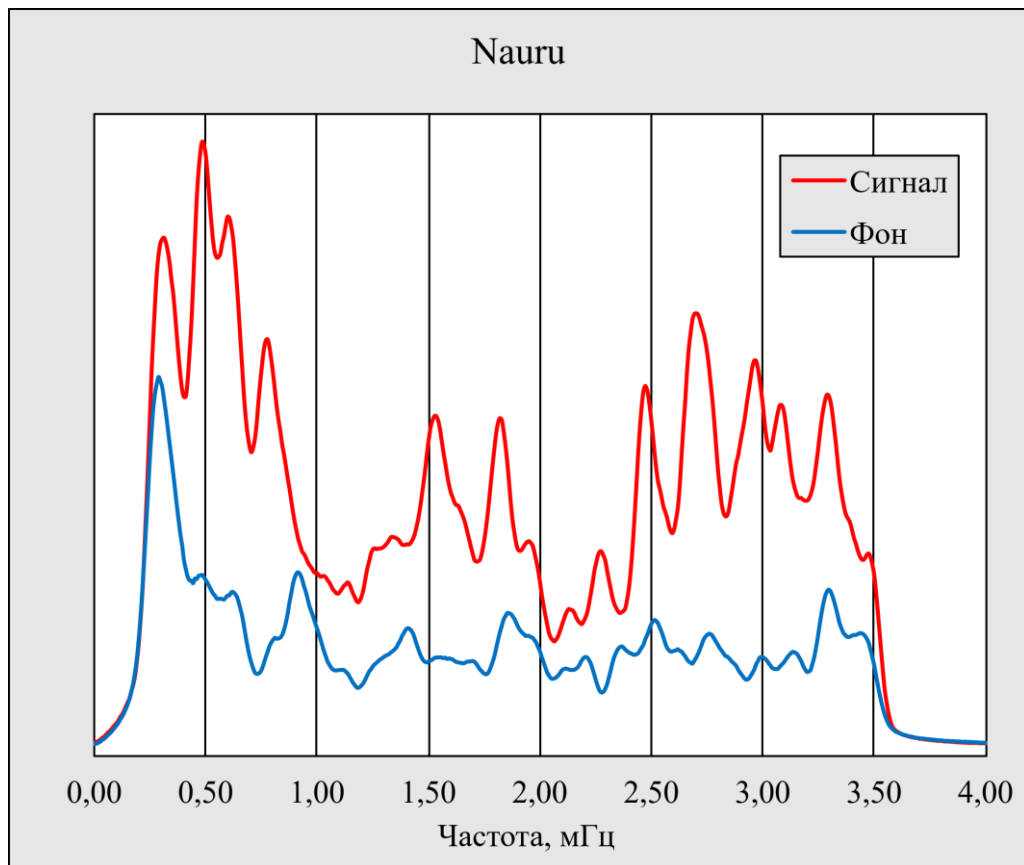


Рис. 3.20. Фрагмент записи уровнемерной станции Nauru.

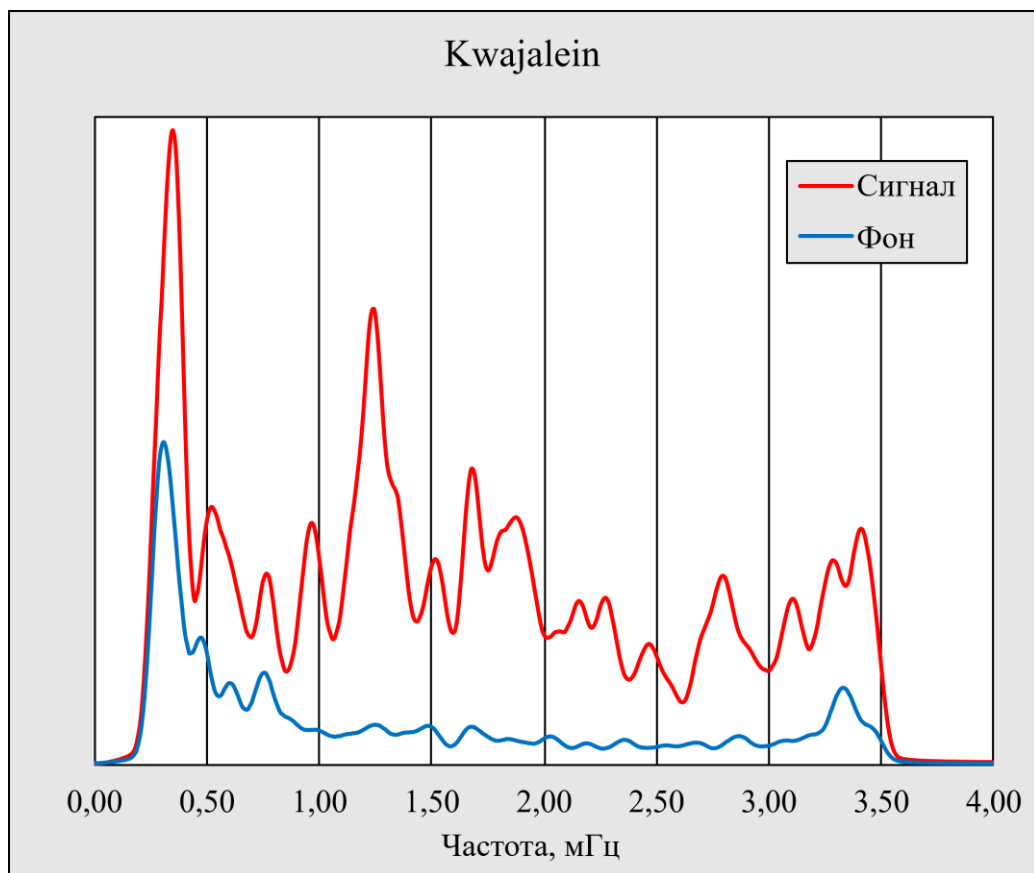


Рис. 3.21. Фрагмент записи уровнемерной станции Kwajalein.

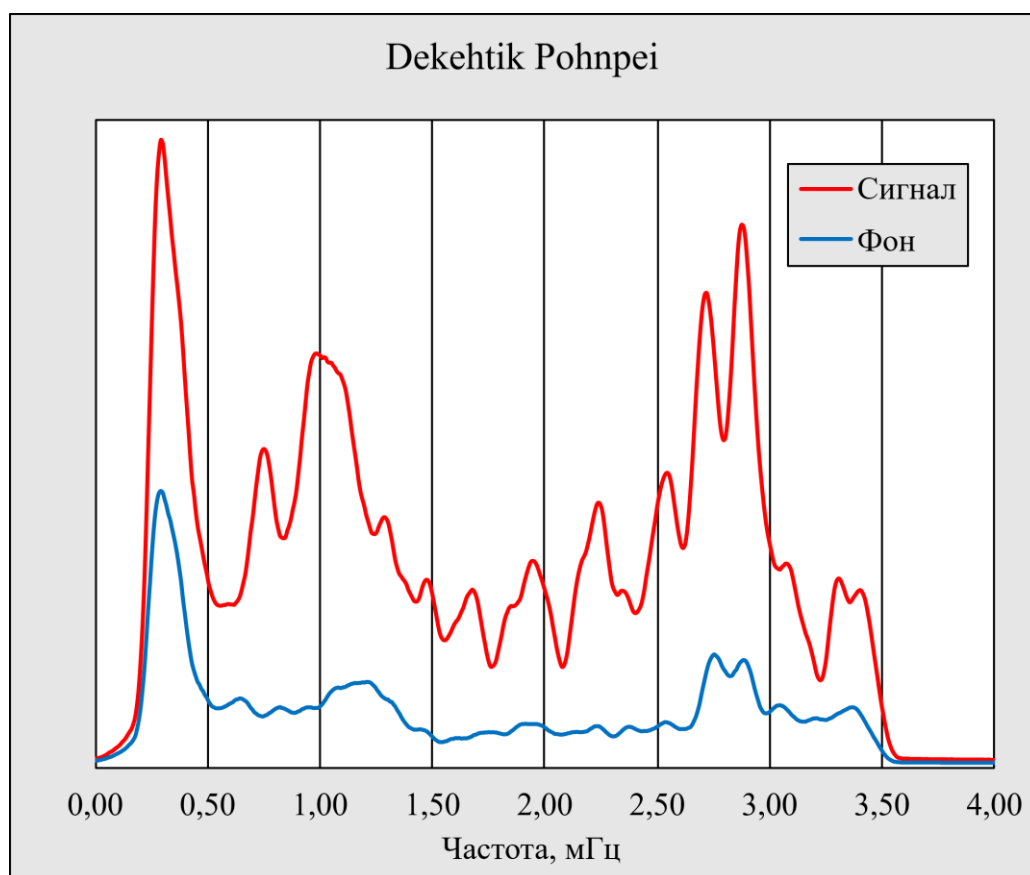


Рис. 3.22. Фрагмент записи уровнемерной станции Dekehtik Pohnpei.

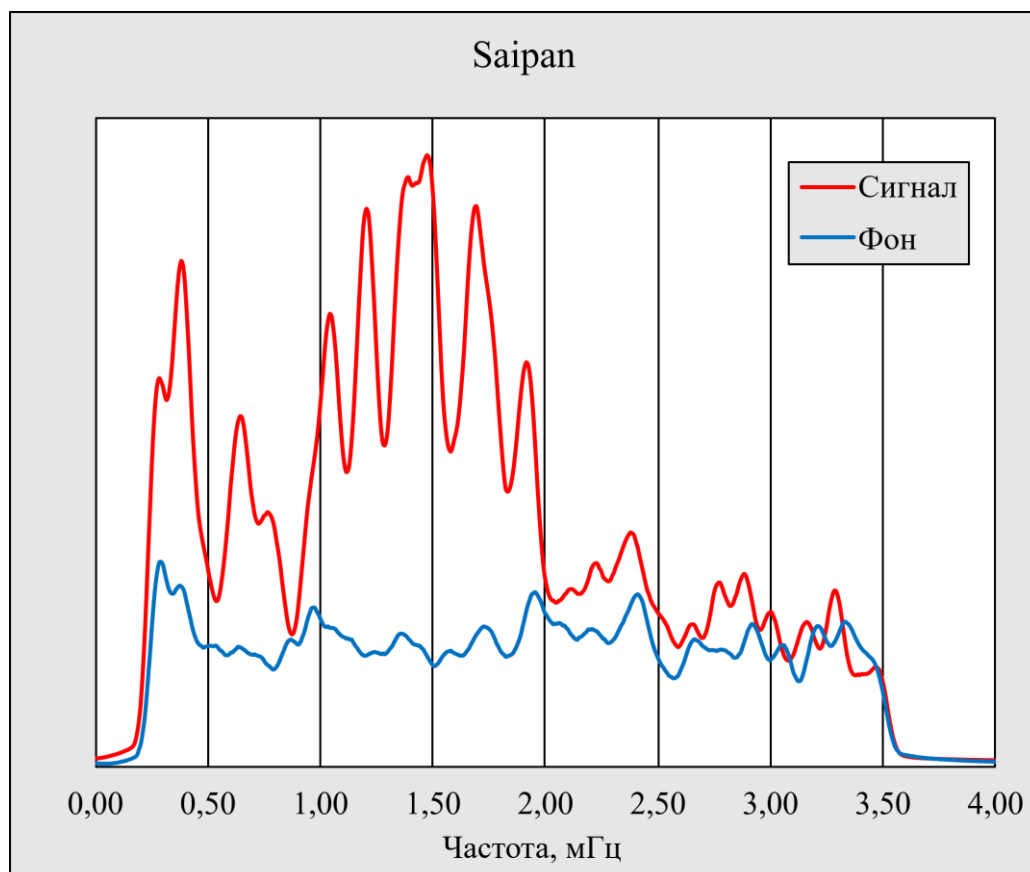


Рис. 3.23. Фрагмент записи уровнемерной станции Saipan.

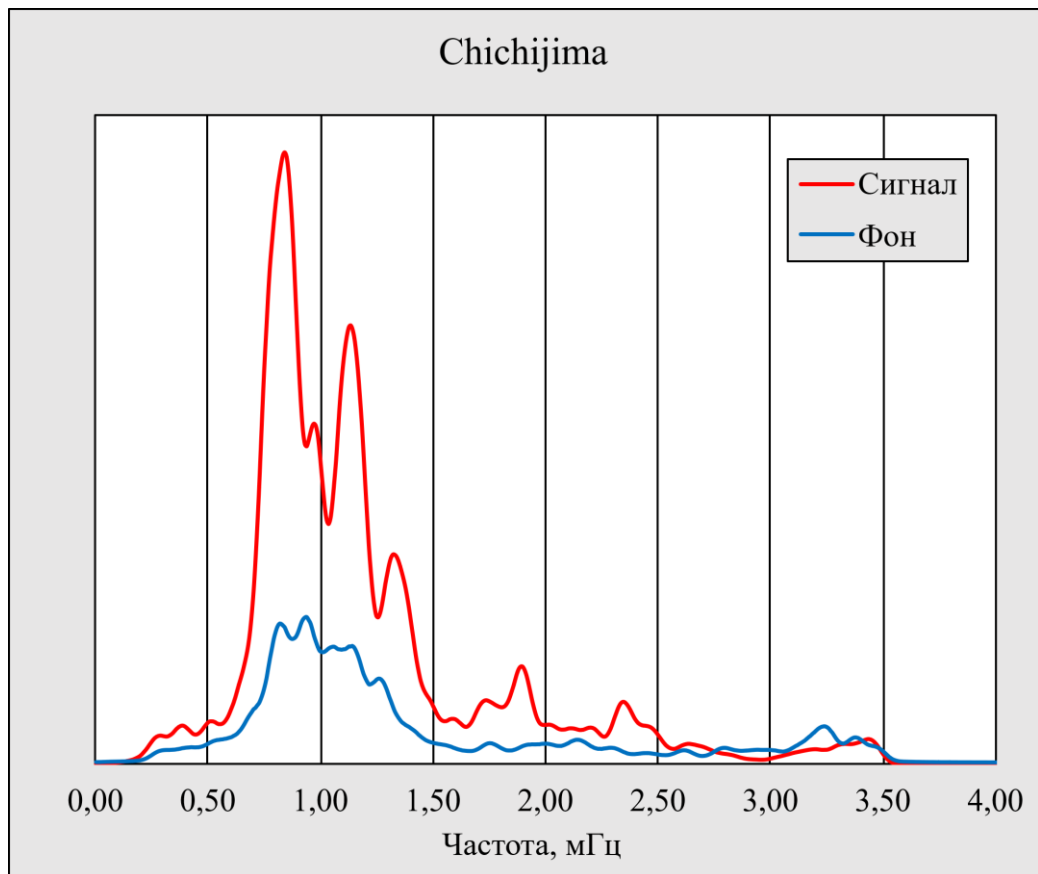


Рис. 3.24. Фрагмент записи уровнемерной станции Chichijima.

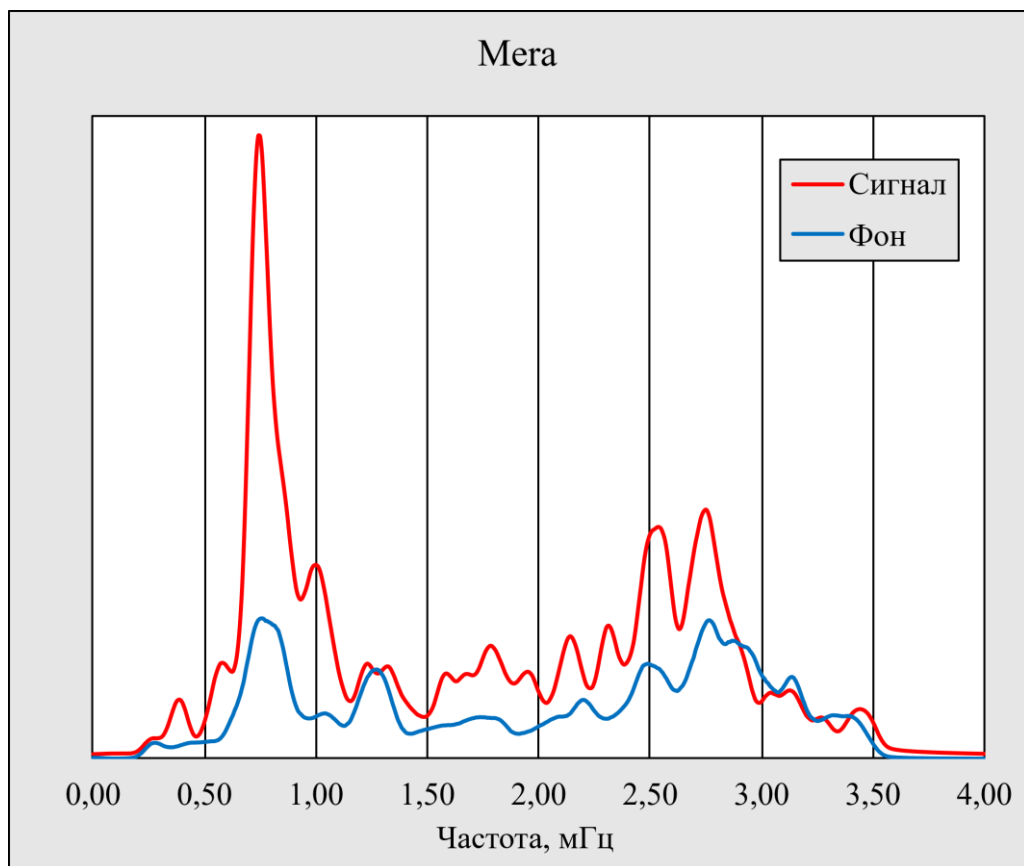


Рис. 3.25. Фрагмент записи уровнемерной станции Mera.

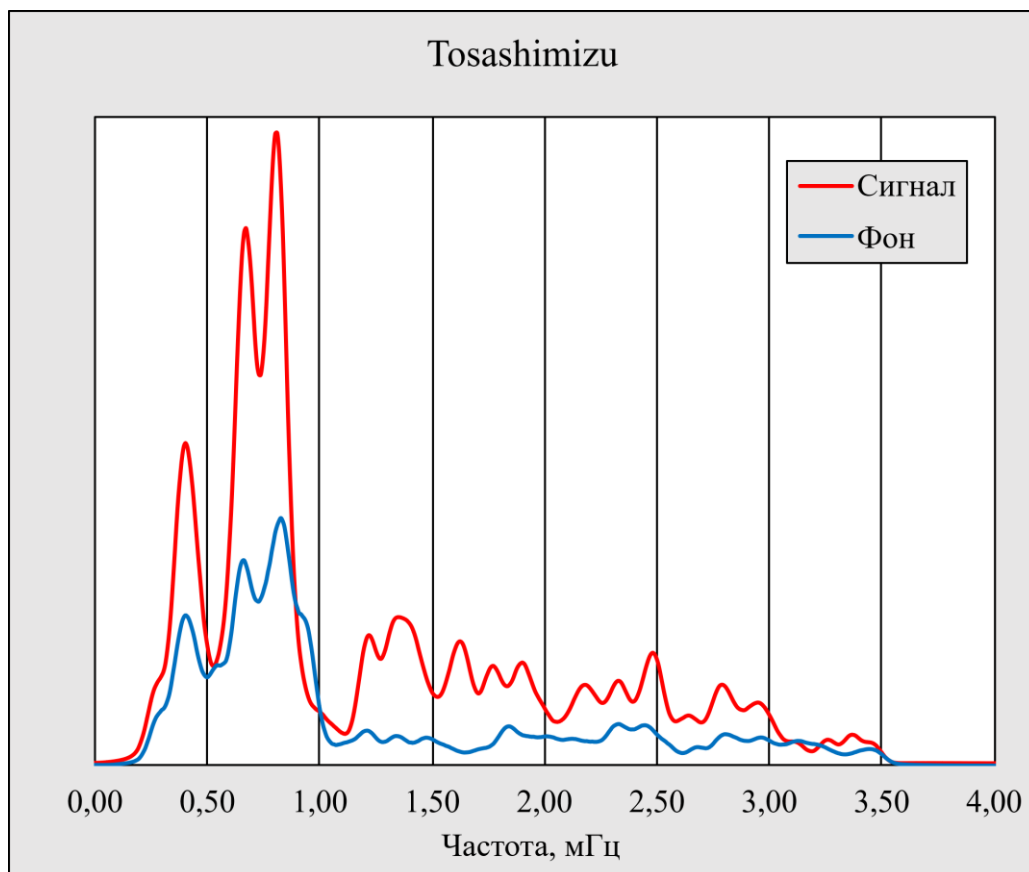


Рис. 3.26. Фрагмент записи уровнемерной станции Tosashimizu.

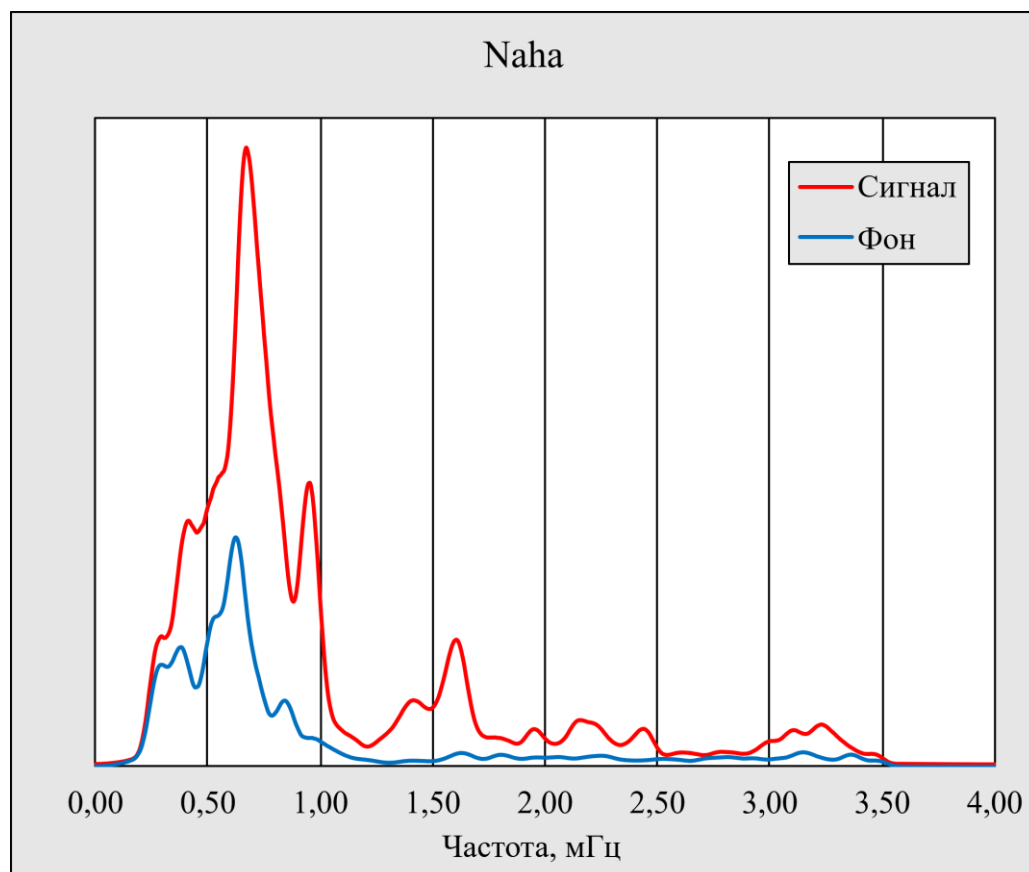


Рис. 3.27. Фрагмент записи уровнемерной станции Naha.

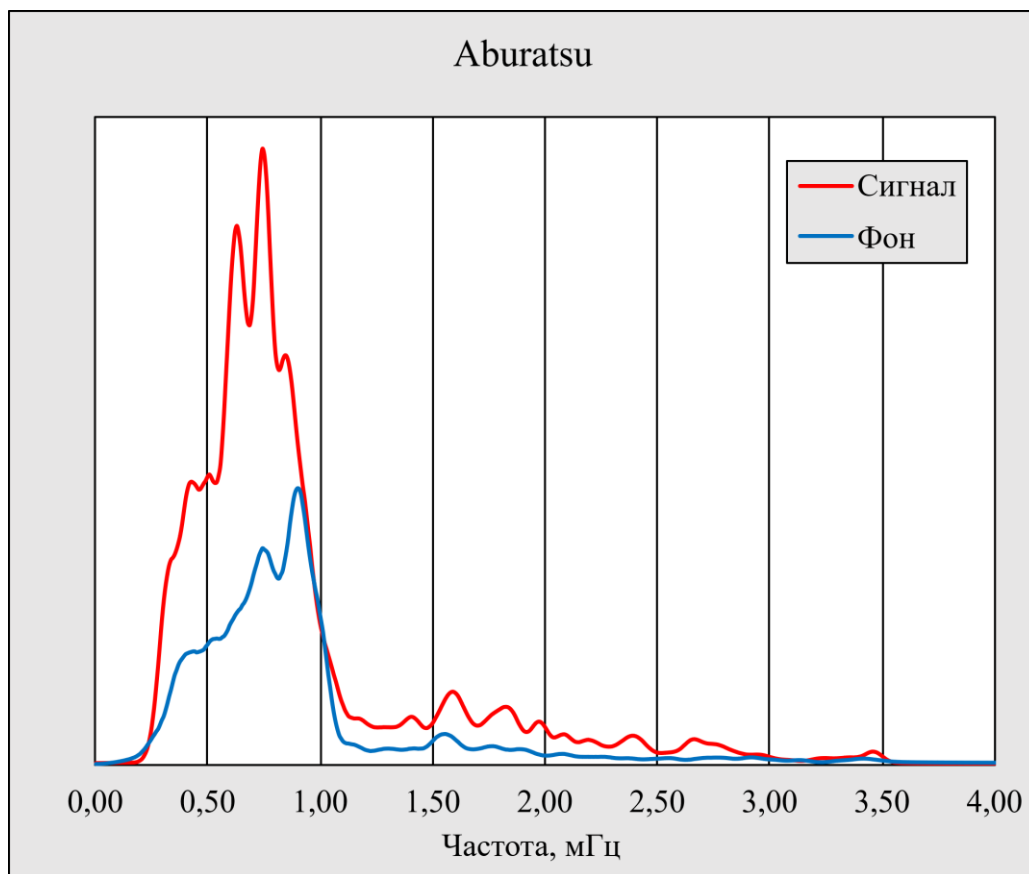


Рис. 3.28. Фрагмент записи уровнемерной станции Aburatsu.

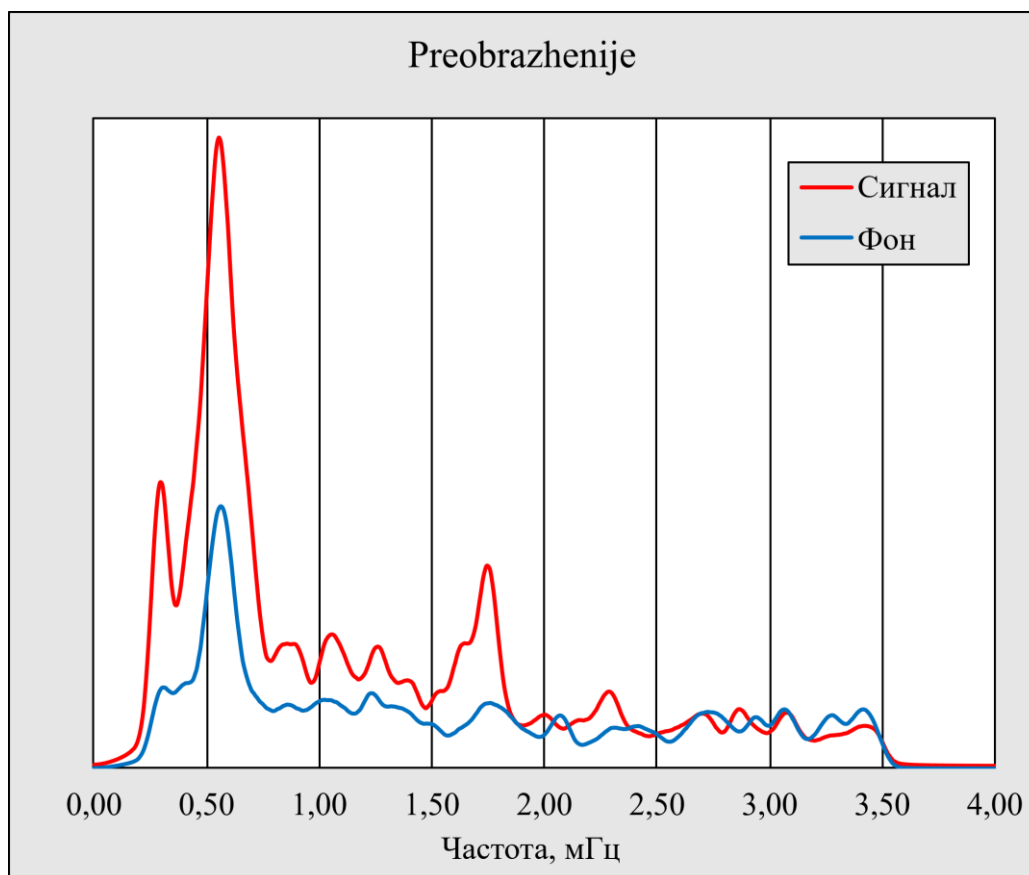


Рис. 3.29. Фрагмент записи уровнемерной станции Preobrazhenije.

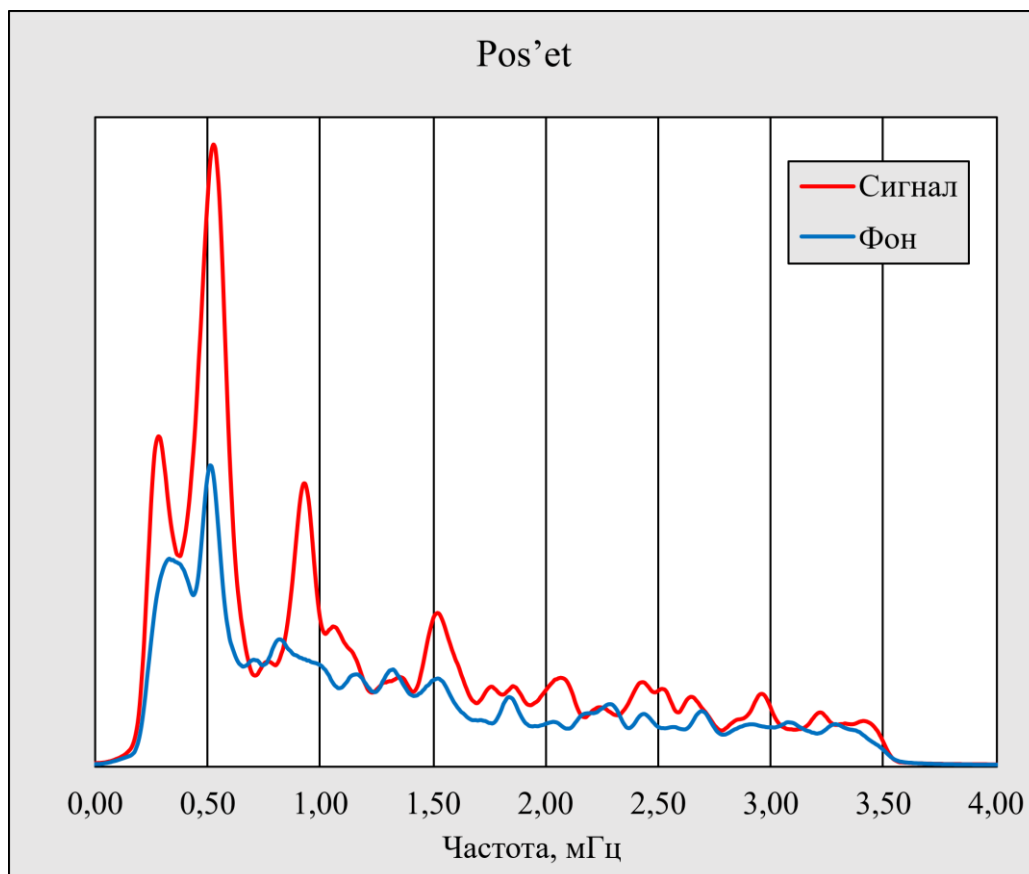


Рис. 3.30. Фрагмент записи уровнемерной станции Pos'et.

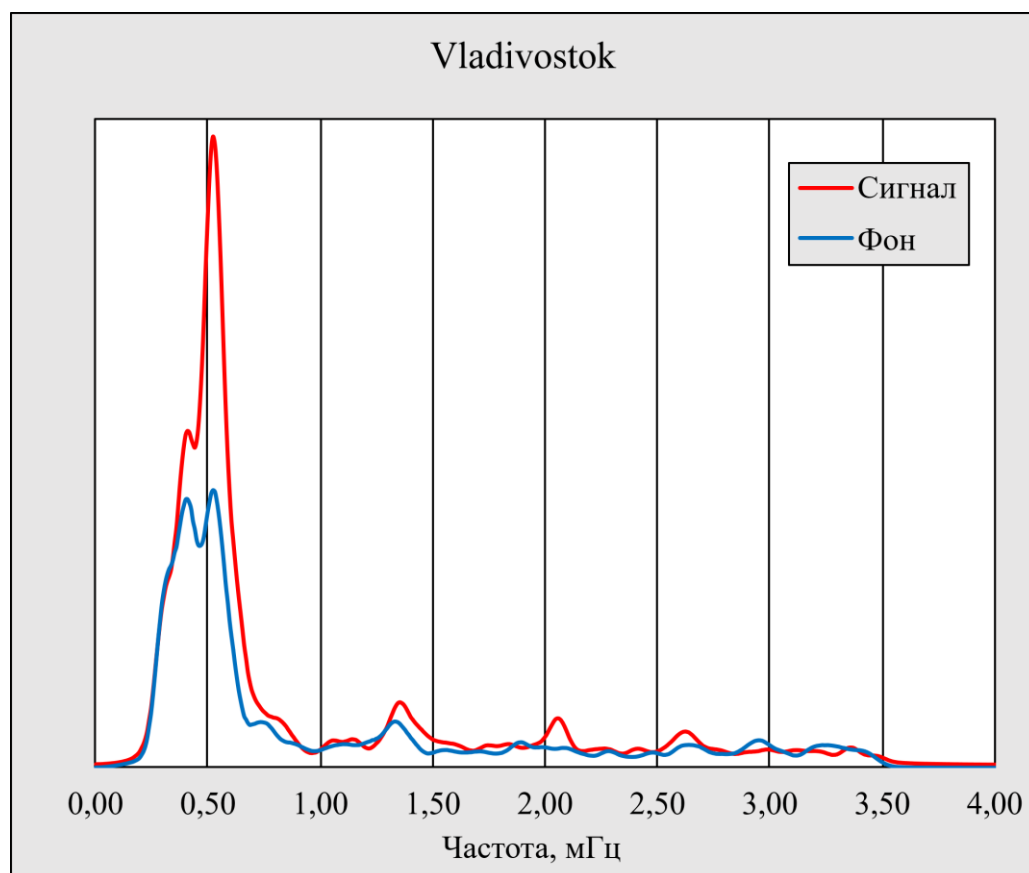


Рис. 3.31. Фрагмент записи уровнемерной станции Vladivostok.

В таблице 3.1 приведены результаты спектральной обработки экспериментальных данных. В таблицу введены следующие обозначения: в первом столбце указаны названия морских уровнемерных станций, во втором столбце приведены названия фрагментов в фоновый период и во время регистрации сигналов возмущений, в столбцах 3, 4, 5 указаны периоды выявленных максимумов, в столбце 6 – скорость распространения возмущающего сигнала от вулкана к точке станции. Для анализа были отобраны фрагменты данных длительностью 4096 секунд с частотой дискретизации 1 Гц. Обработка осуществлялась методом быстрого преобразования Фурье. Для каждой из 14 станций выделили два фрагмента: фоновый (до прихода возмущённого сигнала) и фрагмент с возмущённым сигналом. Из 14 обработанных станций на 9 выявлены спектральные максимумы с периодами, совпадающими с фоновыми. Это свидетельствует о том, что возникновение этих сигналов произошло во время прихода атмосферного возмущения, возникшего в результате взрыва вулкана.

Таблица 3.1. Статистика результатов обработки записей уровнемерных станций.

Станция		Максимум 1	Максимум 2	Максимум 3	Скорость, м/с
1	2	3	4	5	6
Aria Upolu WS	Фон	1 ч 04 мин 13 сек	25 мин 41,4 сек	18 мин 21,0 сек	
	Сигнал	11 мин 56,9 сек	30 мин 13,4 сек (0,027)	18 мин 21,0 сек (0,021)	218
Fongafale	Фон	42 мин 48,9 сек	8 мин 01,7 сек	6 мин 35,2 сек	
	Сигнал	9 мин 52,8 сек	42 мин 48,9 сек	20 мин 33,1 сек	209
Betio Tarawa	Фон	32 мин 02,7 сек			
	Сигнал	32 мин 02,7 сек	7 мин 25,8 сек	10 мин 03,2 сек	212
Nauru	Фон	51 мин 22,7 сек	39 мин 31,3 сек	13 мин 53,2 сек	
	Сигнал	6 мин 15,9 сек	36 мин 41,9 сек	28 мин 32,6 сек	222
Kwajalein	Фон	58 мин 48,5 сек	5 мин 14,4 сек	37 мин 48,3 сек	
	Сигнал	13 мин 55,7 сек	48 мин 07,0 сек	9 мин 37,4 сек	235



Dekehtik Pohnpei	Фон	56 мин 58,1 сек	16 мин 01,3 сек	5 мин 53,6 сек	
	Сигнал	56 мин 51,0 сек	14 мин 9,8 сек	6 мин 0,1	
Saipan	Фон	56 мин 51 сек	23 мин 15,4 сек	7 мин 12,4 сек	
	Сигнал	11 мин 53,9 сек	9 мин 50,4 сек	13 мин 49,7 сек	279
Chichijima	Фон	20 мин 28,0 сек	16 мин 30,3 сек	13 мин 49,7 сек	
	Сигнал	20 мин 28,0 сек	15 мин 02,9 сек	12 мин 47,5 сек	286
Mera	Фон	6 мин 09,9 сек	5 мин 19,8 сек	22 мин 14,7 сек	
	Сигнал	22 мин 14,7 сек	6 мин 05,5 сек	6 мин 38,7 сек (	290
Tosashimizu	Фон	20 мин 28,0 сек	39 мин 21,4 сек		
	Сигнал	20 мин 28,0 сек	24 мин 21,8 сек	42 мин 38,2 сек	290
Naha	Фон	26 мин 55,7 сек			
	Сигнал	24 мин 21,8 сек	10 мин 26,5 сек		
	Сигнал	22 мин 14,7 сек	25 мин 34,9 сек	19 мин 40,7 сек	288
Preobrazhenije	Фон	31 мин 58,7 сек	15 мин 59,3 сек		
	Сигнал	30 мин 05,8 сек	9 мин 28,5 сек	15 мин 59,3 сек	293
Pos'et	Фон	31 мин 58,7 сек	17 мин 38,6 сек	10 мин 53,2 сек	
	Сигнал	30 мин 05,8 сек	17 мин 38,6 сек	11 мин 22,2 сек	287
Vladivostok	Фон	39 мин 21,4 сек	31 мин 58,7 сек		
	Сигнал	31 мин 58,7 сек			286

Если мы считаем, что наряду с атмосферным возмущением, приведшим к возникновению метеоцунами, взрыв вулкана должен вызвать классическое цунами, то мы можем поискать это возмущение в записях станций, показанных на рисунках 3.2-3.16. Трудно понять, с какой скоростью должна распространяться классическая волна цунами. Рассчитаем эту скорость в соответствии с выражением  $v = \sqrt{gh}$  на глубинах 2000 или 4000 м. Задержка классического цунами по сравнению с

метеорологическим цунами для каждой приемной станции, перечисленной в таблице 3.1, составит:

– Apia Upolu WS –	с 37 мин 54 сек	до 6 мин 52 сек;
– Fongafale –	с 1 ч 05 мин	до 6 мин 46 сек;
– Betio Tarawa –	с 1 ч 53 мин 51 сек	до 15 мин 39 сек;
– Nauru –	с 2 ч 12 мин 07 сек	до 27 мин 21 сек;
– Kwajalein –	с 3 ч 03 мин 21 сек	до 50 мин 30 сек;
– Dekehtik Pohnpei –	с 3 ч 41 мин 16 сек	до 1 ч 12 мин 26 сек;
– Saipan –	с 5 ч 48 мин 31 сек	до 2 ч 23 мин 36 сек;
– Chichijima –	с 7 ч 08 мин 51 сек	до 3 ч 02 мин 46 сек;
– Mera –	с 8 ч 02 мин 25 сек	до 3 ч 29 мин 13 сек;
– Tosashimizu –	с 8 ч 21 мин 09 сек	до 3 ч 37 мин 20 сек;
– Naha –	с 8 ч 15 мин 38 сек	до 3 ч 33 мин 07 сек.

При изучении записей четырнадцати указанных станций не удалось обнаружить сигналов, соответствующих цунами, которые прошли по водной поверхности от места извержения вулкана.

### 3.3 Выводы к главе

В результате обработки данных морских уровнемерных станций были получены значения периодов сигналов колебаний морской поверхности. По полученным результатам можно сделать вывод, что Атмосферные колебания, распространяясь над морской поверхностью генерировали метеоцунами в акваториях Тихого океана и Японского моря.

Признаков классического цунами на записях уровнемерных станций не было обнаружено.

## Глава 4

### Воздействие атмосферных колебаний на гидросферу

В главе описывается сравнение ГНСС-данных ионосферы с записями данных морских уровнемерных станций. В результате сравнения обнаружены атмосферные колебания, которые вызывают колебания в гидросфере.

Материал, описанный в данной главе, опубликован в работе [91-92, 98].

#### 4.1. Метод сравнения данных

Для сопоставления ГНСС-данных ионосферы с записями морских уровнемерных станций были использованы ГНСС-станции, представленные на рисунке 4.1 и уровнемерные станции описанные в главе 3. ГНСС-данные получены с помощью спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. Проекция движения спутников на земную поверхность охватывают ряд территорий и акваторий. Согласно главе 2, высота максимальной ионизации составляет 306 км; методика расчёта ТЕС изложена в главе 1. Геомагнитная обстановка в период наблюдений была возмущённой (глава 2).

Зная проекции движения спутника на слой максимальной ионизации (определяются линией «ГНСС-приёмник – спутник»), можно вычислить ТЕС ионосферного слоя над конкретной территорией или акваторией. Для анализа выбраны ГНСС-станции на территории Приморского края. Соответственно, для сопоставления данных пригодны уровнемерные станции 9, 10, 12–15, а также частично станции 8 и 11 — при условии, что проекции движения спутников проходили над ними или в непосредственной близости.

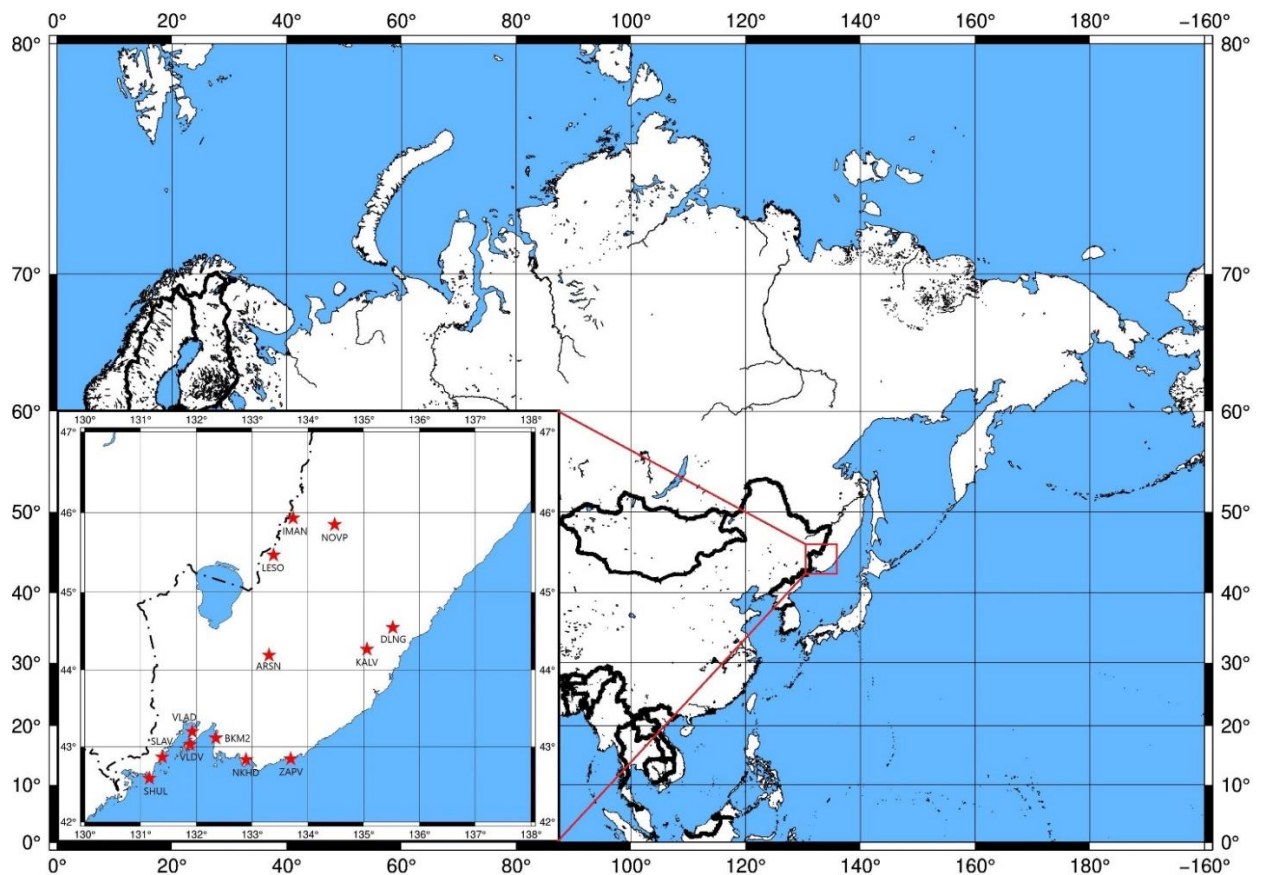


Рис. 4.1. ГНСС-станции Приморского края.

При анализе участков данных ТЕС над или вблизи конкретной станции уровня важно использовать максимально короткий временной ряд — это позволяет локализовать колебания в определённой области, однако ухудшает частотное разрешение. В качестве минимальной длины ряда определена длина равная 128 точкам с разрешением по частоте (при обработке периодограммным методом)  $1/(127T)$ , где  $T$  - период выборки. Для повышения частотного разрешения применён метод оценки максимального правдоподобия [99] с 60 гармониками — это примерно соответствует числу гармоник, выявленных при обработке периодограммным методом.

## 4.2. Обработка и анализ данных

В таблице 4.1 приведены результаты обработки данных морских уровнемерных станций. Поскольку скорость распространения возмущения (импульса взрыва) от вулкана к каждой станции несколько ниже скорости звука в

воздухе, можно заключить: колебания уровня моря на станциях вызваны колебаниями атмосферного давления, возникшими при прохождении через атмосферу импульса от извержения. Однако нельзя исключать и возбуждение колебаний уровня моря самим взрывным импульсом. Таким образом, можно рассмотреть два механизма возбуждения колебаний водной поверхности, регистрируемых уровнемерными станциями:

1) собственные колебания определенной области атмосферы над конкретной уровнемерной станцией;

2) собственные колебания региона Тихого океана (сейши и т.д.), возбуждаемые проходящим атмосферным потоком.

Для наглядности данные за периоды, указанные в таблице 4.1, представлены в виде спектров (рис. 4.2). Где красная линия указывает на спектр сигнала, а синяя линия указывает на фоновый спектр.

Таблица 4.1. Периоды, полученные по морским уровнемерным станциям.

Номер станции	Станция	Период, фон	Период, сигнал
8	Chichijima	20 мин 28,0 сек 16 мин 30,3 сек 13 мин 49,7 сек	20 мин 28,0 сек 15 мин 02,9 сек 12 мин 47,5 сек
9	Mera	6 мин 09,9 сек 5 мин 19,8 сек 22 мин 14,7 сек	22 мин 14,7 сек 6 мин 05,5 сек 6 мин 38,7 сек
10	Tosashimizu	20 мин 28,0 сек 39 мин 21,4 сек	20 мин 28,0 сек 24 мин 21,8 сек 42 мин 38,2 сек
11	Naha	26 мин 55,7 сек	24 мин 21,8 сек 10 мин 26,5 сек 22 мин 14,7 сек 25 мин 34,9 сек 19 мин 40,7 сек
12	Aburatsu	26 мин 55,7 сек 17 мин 38,6 сек 11 мин 37,7 сек	22 мин 14,7 сек 10 мин 26,5 сек 9 мин 18,2 сек
13	Preobrazheniye	31 мин 58,7 сек 15 мин 59,3 сек	30 мин 05,8 сек 9 мин 28,5 сек 15 мин 59,3 сек
14	Pos'et	31 мин 58,7 сек 17 мин 38,6 сек 10 мин 53,2 сек	30 мин 05,8 сек 17 мин 38,6 сек 11 мин 22,2 сек
15	Vladivostok	39 мин 21,4 сек 31 мин 58,7 сек	31 мин 58,7 сек

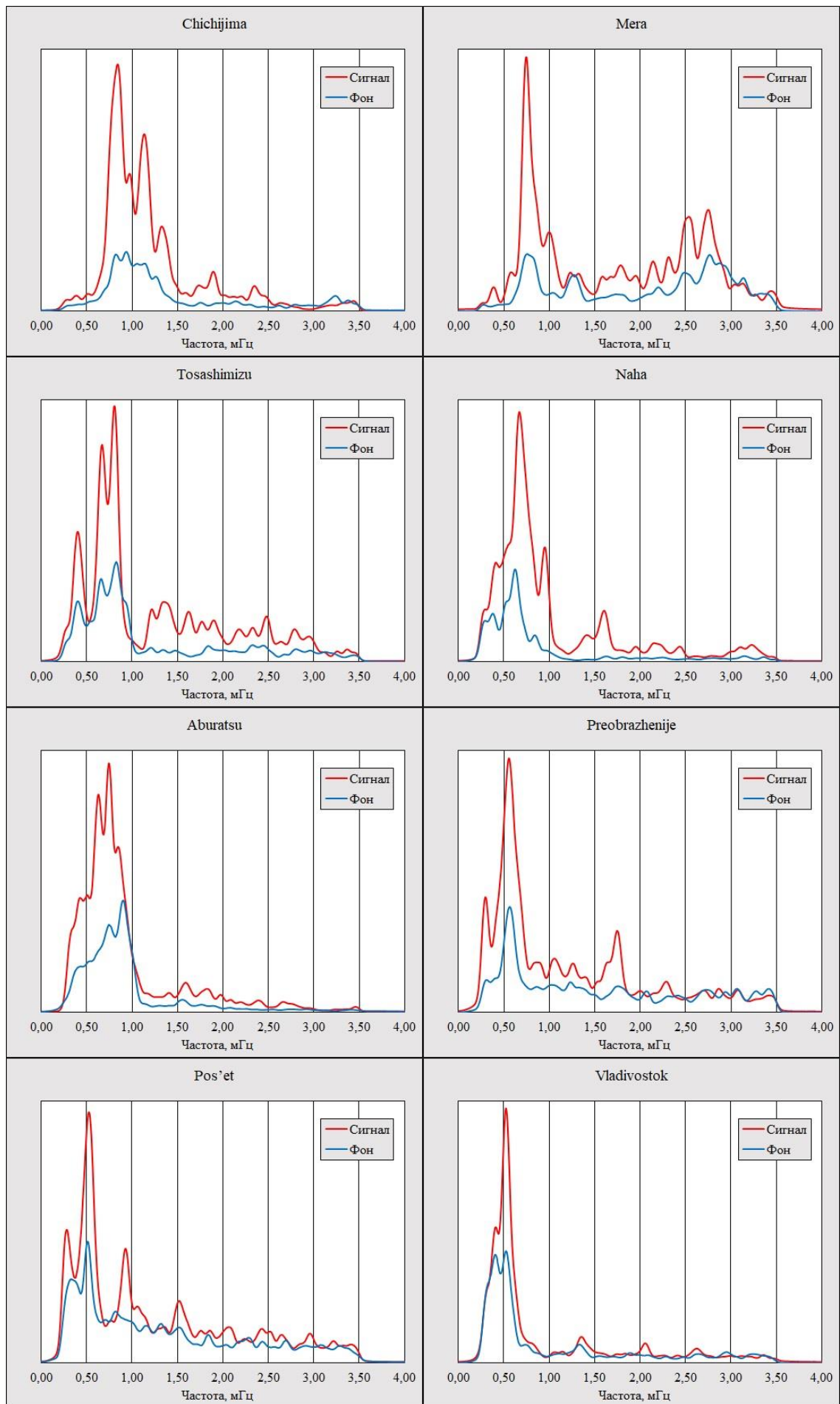


Рис. 4.2. Данные спектров уровнемерных станций 8-15.

В таблице 4.2 приведены периоды, полученные для конкретной ГНСС-станции и спутника. К сожалению, основная часть записей по длительности не подходит для полноценной обработки. Тем не менее имеющиеся результаты содержат достаточный объём информации для выводов о природе колебаний, зафиксированных как в ГНСС-данных, так и в записях уровнемерных станций. Перед анализом отметим: частота дискретизации всех записей одинакова — около 0,033 Гц (период дискретизации 30 секунд).

Таблица 4.2. Периоды по ГНСС-данным.

Номер морской станции	станция ARSN – спутник	станция BKM2 – спутник	станция KALV – спутник	станция SLAV – спутник	станция VLAD – спутник	станция SHUL – спутник	станция ZAPV – спутник	станция IMAN – спутник
8			05:39-06:43 R21 14:03,2 18:17,7					
9	07:04-08:09 G31 06:42,4	07:18-08:22 G31 07:58,2	06:43-7:47 R21 22:03,1 05:59,6	06:39-08:48 R11 22:47,4 21:46,9	05:40-09:57 G26 21:36,3	09:38-10:44 G16 21:57,7	05:36-10:17 R21 22:01,5  06:40-08:49 R21 04:50,8  22:11-23:16 R21 22:23,5  06:31-09:54 G26 22:49,3	

10	7:00-8:05 R12 19:57,7	10:51-11:56 R12 19:06,2		07:00-11:34 R22 42:43,0	05:40-06:45 R21 20:29,9		06:40-08:49 R21 43:21,2	08:06-11:48 R12 42:38,2
	07:04-08:09 G31 41:23,4 20:15,9	05:36-06:40 G27 39:56,6		06:40-07:45 R21 24:42,5	08:03-11:54 R12 38:36,6		03:31-04:37 G26 41:56,0 19:02,1	06:06-11:48 R12 42:14,6
	07:04-08:09 G31 20:15,9	06:34-07:39 G27 44:22,5		06:39-08:48 R11 41:39,6	05:32-07:41 G31 19:41,4		03:47-08:04 G26 19:09,6	05:52-06:57 G27 19:50,2
		04:18-05:23 G16 44:22,5			05:45-12:14 G27 43:11,5 21:24,7			
11		05:36-06:40 G27 19:08,9						
12		05:36-06:40 G27 11:53,5 c			05:45-06:50 G27 22:21,6 10:17,5		03:31-04:37 G26 21:59,5	
13	09:09-10:13 R22 09:09,3	07:51-08:56 R12 29:55,9	05:46-06:51 G16 15:20,8	06:40-07:45 R21 09:43,0	07:26-08:24 R22 09:14,4 15:23,5	04:32-05:37 G26_1 09:09,6 15:19,0	22:11-23:16 R21 15:58,5	07:36-11:59 R22 31:46,7
	07:07-09:15 R21 09:28,0		10:03-11:08 G16 30:51,3	05:36-10:20 R21 31:44,9	05:40-06:45 R21 15:35,2 09:13,8	05:32-06:37 G26 09:01,0	06:49-07:54 R11 09:09,0	05:52-12:18 G27 30:26,3
	08:20-11:31 R12 30:45,8			07:38-08:44 G16 16:12,1	05:39-10:14 R21 30:54,1	06:42-07:47 G16 09:04,7	05:43-07:51 G16 30:35,4 09:03,6 09:49,5	11:37-13:46 G08 09:54,0



	06:07- 07:13 G27 09:09,3				22:15- 23:42 R21 15:56,6			
	07:00- 09:09 G26 16:15,6				05:32- 07:41 G31 15:36,1			
	09:00- 10:05 G08 09:04,0				06:33- 08:42 G16 09:46,1			
					10:20- 11:26 G16 09:45,9			
14	06:03- 07:07 R21 17:05:0	09:56- 11:00 R22 17:50,8	05:46- 06:51 G16 10:35,1	05:36- 10:20 R21 31:44,9	07:26- 11:44 R22 11:02,1	03:32- 04:35 G26 10:44,0	04:32- 06:41 G26 17:01,2	07:36- 11:59 R22 17:02,0
	08:20- 10:29 R12 18:00,4	09:52- 10:56 R22 17:27,4	06:46- 07:51 G16 17:25,1	03:32- 04:37 G26 10:41,9	06:44- 07:49 R21 11:05,9		05:43- 07:51 G16 30:35,4 11:13,9	05:52- 12:18 G27 30:26,3
	08:20- 11:31 R12 30:45,8	07:51- 10:00 R12 17:53,2		04:32- 05:37 G26 11:00,9	22:15- 23:20 R21 11:32,4			06:57- 08:01 G08 17:36,6
	07:08- 08:13 G08 16:51,0	04:32- 06:41 G31 10:50,4			08:03- 10:12 R12 17:07,6 11:55,0			
	08:00- 09:05 G08 30,09,4	06:34- 07:39 G27 17:11,6 11:23,0			06:45- 08:54 G27 11:36,1			
		05:35- 12:18 G27 17:21,3			05:45- 12:14 G27 18:02,8			

		11:49,7  06:31-07:37 G26 17:40,1 10:26,0  06:12-07:17 G16 11:07,3			05:40-09:57 G26 17:04,5  10:20-11:26 G16 17:54,4			
15	08:20-09:25 R12 39:44,7 29:35,9  08:20-10:29 R12 41:29,9  08:20-11:31 R12 40:44,4  06:48-11:05 G16 40:01,1 32:32,0  08:20-09:25 R12 29:35,9	07:51-10:00 R12 40:02,6  05:12-06:17 G16 39:38,8 10:56,4	05:46-06:51 G16 39:33,0	06:39-07:44 G16 30:51,3 31:28,6		05:41-06:47 G16 29:39,2	05:43-07:51 G16 30:35,4	06:24-08:33 G27 31:31,4  08:56-10:01 G08 31:59,1

Обработка полученных данных была направлена на определение параметров ключевых колебательных процессов, присутствующих в каждой записи. Спектральная оценка осуществлялась посредством двух различных методов: периодограммного метода и метода оценки максимального правдоподобия. В методе оценки максимального правдоподобия число гармоник было установлено

равным 60. Некоторые записи показали характерные сильные пики для определенного региона. На рисунке 4.3 показан график изменений TEC, полученный с помощью ГНСС-станции ARSN спутника G08, на рисунке 4.4 показан трек.

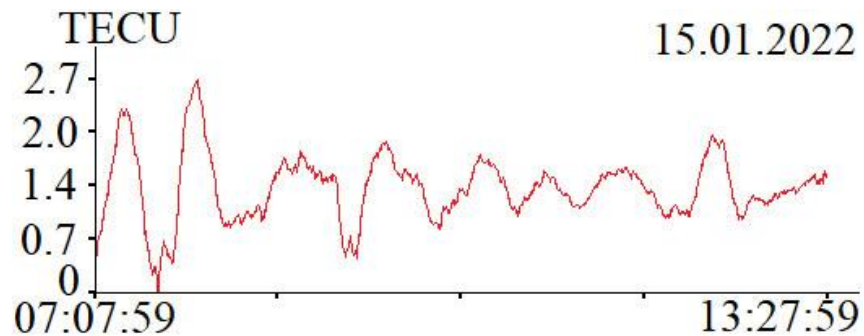


Рис. 4.3. График изменения TEC ARSN-G08.



Рис. 4.4. Трек ARSN-G08.

На графике, показанном на рисунке 4.3, без спектральной обработки видны мощные низкочастотные колебания ТЕС. Спектральная обработка этого ряда методом оценки максимального правдоподобия обеспечивает лучшее частотное разрешение, чем спектральная обработка периодограммным методом. На рисунке 4.5а показан спектр, полученный при обработке этого ряда периодограммным методом (с тремя усреднениями), а на рисунке 4.5б – методом оценки максимального правдоподобия (с 60 гармониками).

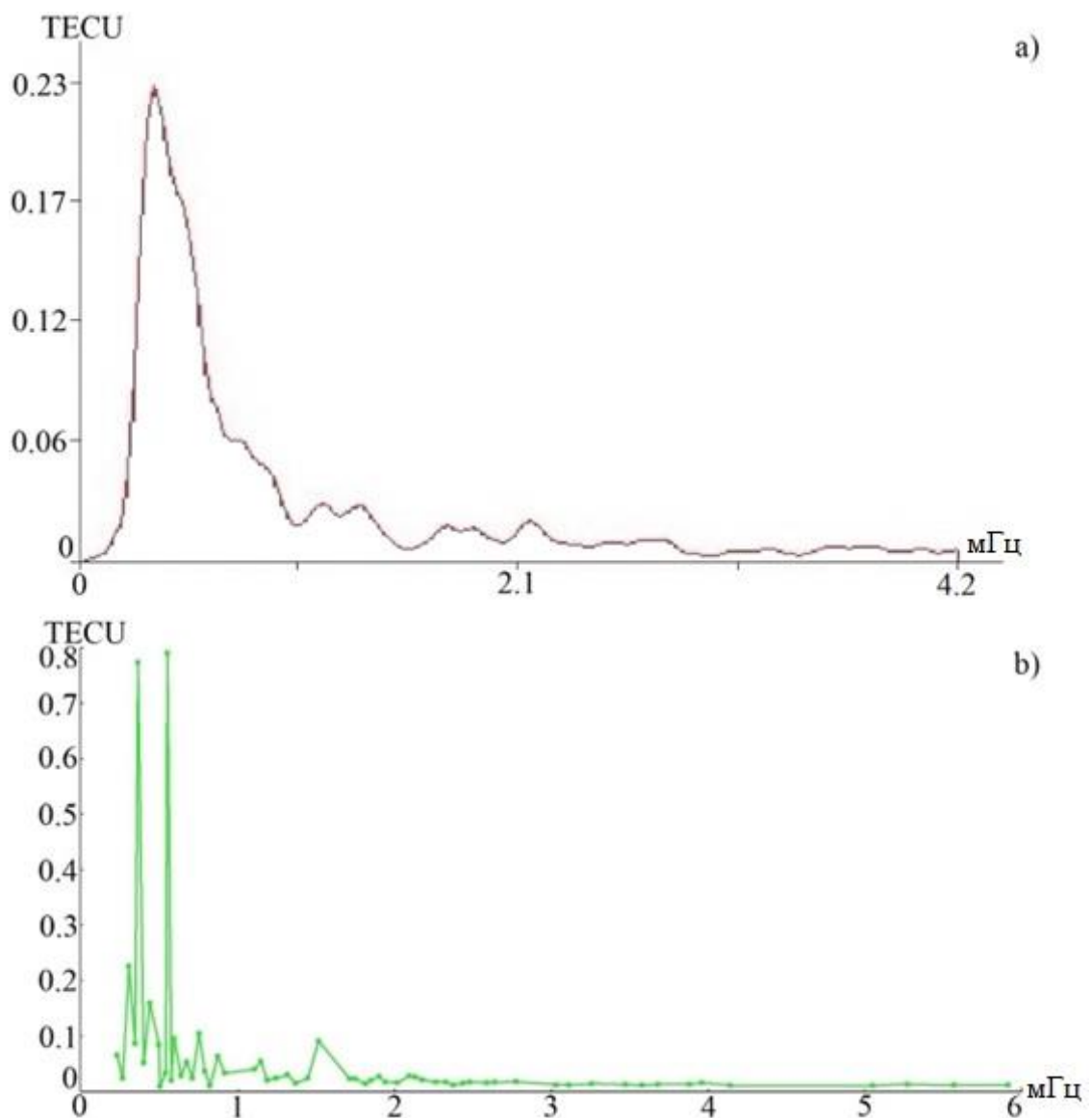


Рис. 4.5. Спектр, полученный путем обработки ряда, показанного на рисунке 4.3, с использованием периодограммного метода (а) и метода оценки максимального правдоподобия (б).

Как мы можем видеть на графике на рисунке 4.5а, спектр содержит мощный пик с периодом 46 мин 32,7 с, а на рисунке 4.5б – два мощных пика с периодами 30 мин 27,8 с ( $A = 0,79$  TECU) и 46 мин 20,4 с ( $A = 0,77$  TECU). Мы также можем отметить пик с периодом 11 мин 01,4 с ( $A = 0,09$  TECU). Если мы посмотрим на трек ARSN-G08, показанный на рисунке 4.4, мы можем отметить, что он проходит над уровнемными станциями 13, 15, 14, показанными на рисунке 3.1, в спектрах колебаний уровня моря которых присутствуют мощные спектральные составляющие с периодами в диапазоне 30-32 мин. В этом случае мы можем констатировать, что мощный пик с периодом 30 мин 27,8 с, полученный в результате обработки данных TEC серии ARSN- G08 (рис. 4.4), по-видимому, имеет то же происхождение, что и выбранные колебания соответствующих периодов на уровнемных станциях.

Рассмотрим другой трек IMAN- R12, показанный на рисунке 4.6. Трек проходит над уровнемными станциями 13 и 15, пересекает Японское море и заканчивается недалеко от уровнемной станции 10. Путем спектральной обработки всего ряда с использованием метода оценки максимального правдоподобия мы получили график, показанный на рисунке 4.7. Из этого спектра видно, что максимальный пик соответствует периоду в 42 мин 14,6 с ( $A = 0,63$  TECU), что близко к периоду колебаний, выбранному в записи уровнемной станции 10. Два других значимых максимума с периодами 34 мин 18,8 с ( $A = 0,38$  TECU) и 31 мин 08,0 с ( $A = 0,27$  TECU) близки к периодам, указанным в записи уровнемной станции 15. Остальные значимые пики в этом спектре близки к максимумам, выявленным при обработке данных записи уровнемных станций 10 и 15. Если мы возьмем более короткий участок, то в результате спектральной обработки методом оценки максимального правдоподобия этой серии мы получим мощные максимумы в спектре с периодами 42 мин 38,2 с, 32 мин 33,0 с и 25 мин 59,2 с. Это периоды, близкие к периодам, выбранным в записях уровнемных станций под номерами 10, 15 и 13 соответственно.

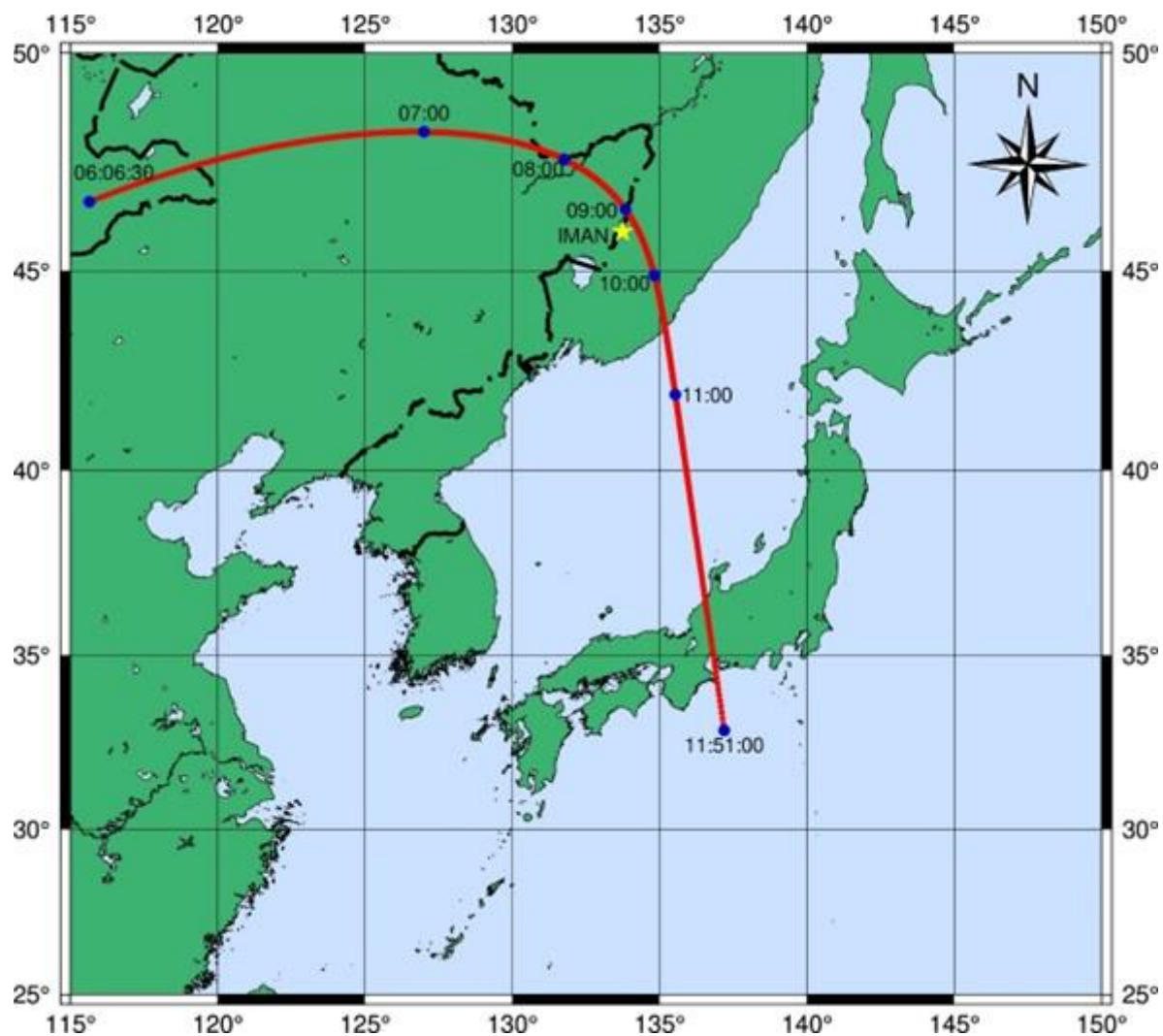


Рис. 4.6. Трек IMAN-R12.

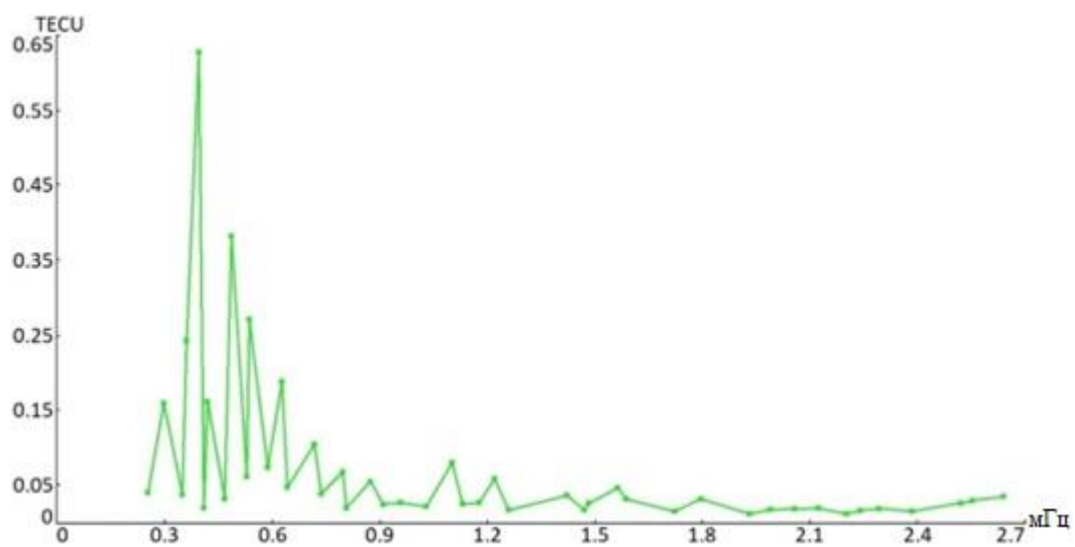


Рис. 4.7. Спектр, полученный путем обработки данных трека IMAN-R12 методом максимального правдоподобия.

На рисунке 4.8 показан трек ВКМ2-G31, проходящий над уровневой станцией 14, пересекающий Японское море, Японские острова и заканчивающийся между уровнями станциями 10 и 9. В этом случае делим файл данных на две части, первая из которых содержит 256 точек, с началом в 04 часа 32 минуты 00,0 с и окончанием в 06 часов 40 минут 30,0 с, вторая - 128 точек, с началом в 07 часов 17 минут 30 с и с окончанием в 06 часов 40 минут 30,0 с конец в 08 ч 22 мин 00,0 с. Каждый фрагмент обрабатываем, используя метод оценки максимального правдоподобия с числом гармоник, равным 60. На рисунке 4.9а показан спектр, полученный в результате обработки первого участка записи ТЕС над/вблизи уровня станции 14, а на рисунке 4.9б - полученный в результате обработки второго участка записи ТЕС вблизи уровней станций 10 и 9. Из рисунка 4.9а видно, что в спектре наблюдаются мощные максимумы с периодами 17 мин 53,8 с ( $A = 0,24$  TECU), 11 мин 33,4 с ( $A = 0,017$  TECU), 30 мин 40,6 с ( $A = 0,08$  TECU), 10 мин 50,4 с ( $A = 0,08$  TECU), которые близки к периодам максимумов, выявленных при обработке данных уровня станции 14. Из рисунка 4.9б мы можем видеть, что значимые максимумы расположены на периодах 59 мин 34,6 с ( $A = 0,23$  TECU), 25 мин 44,5 с ( $A = 0,18$  TECU), 07 мин 58,2 с ( $A = 0,10$  TECU), последние из которых соответствуют максимумам, выбранным в записях из уровней станций 10 и 9, соответственно.



Рис. 4.8. Трек ВКМ2-G31.



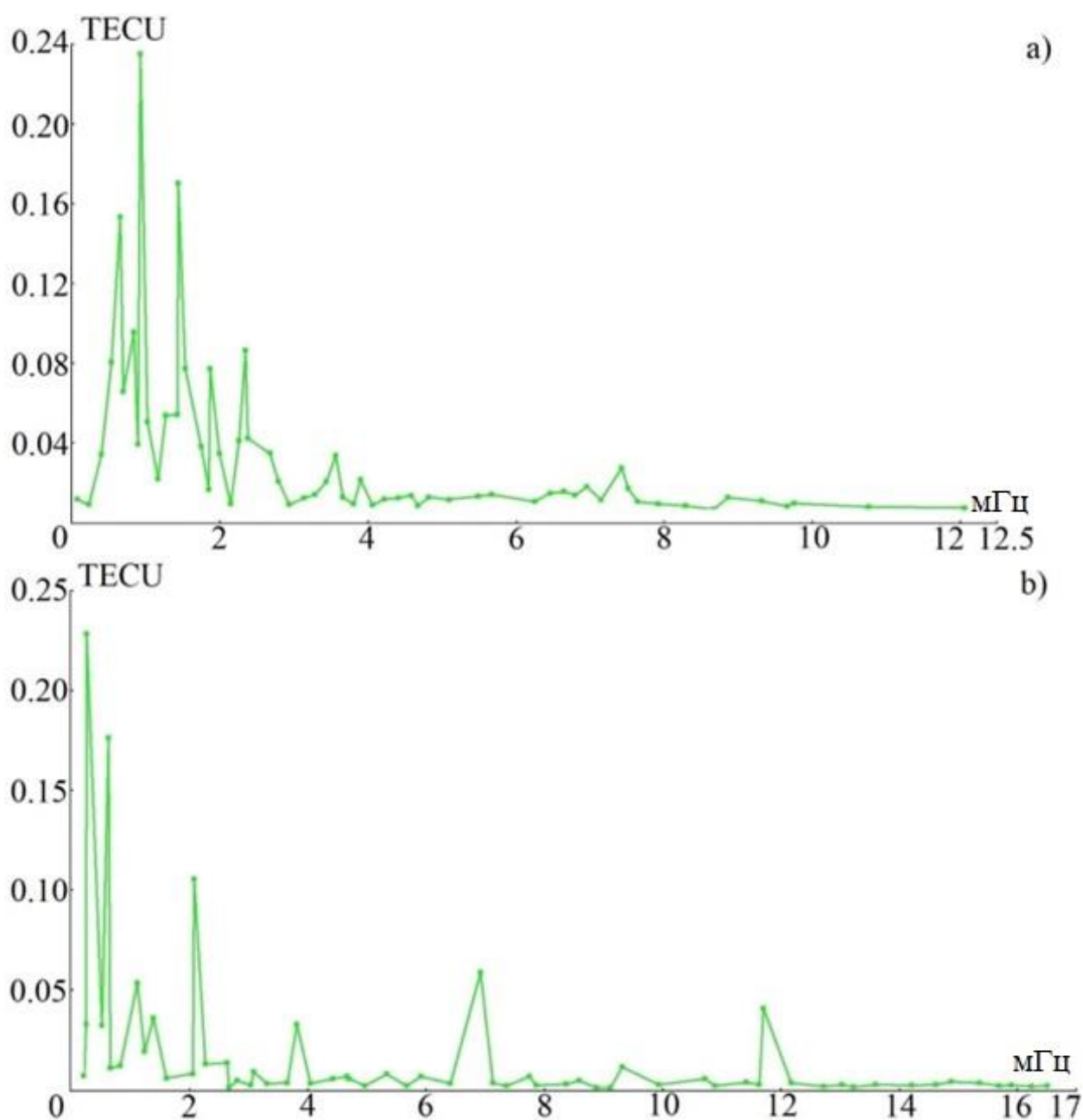


Рис. 4.9. Спектр, полученный в результате обработки первого участка записи трека ВКМ2- G31 (а) и второго участка записи трека ВКМ2- G31 (б).

На рисунке 4.10 показан трек ВКМ2-G27, проходящий над/вблизи равномерными станциями 10, 11, 12, 14. В результате спектральной обработки первых 128 точек (первый участок записи) методом оценки максимального правдоподобия с числом гармоник, равным 60, мы получили спектр, показанный на рисунке 4.11а. Из рисунка 4.11а видно, что мощные максимумы наблюдаются на частотах, соответствующих периодам 39 мин 56,6 с ( $A = 1,16$  TECU), 11 мин 53,5 с

( $A = 1,12$  TECU), 19 мин 08,9 с ( $A = 0,49$  TECU). Периоды этих максимумов близки к периодам максимумов, выявленных при обработке данных с уровнемерных станций под номерами 10, 12 и 11 соответственно. На рисунке 4.11б показан спектр, полученный при обработке второго участка трассы ВКМ2-G27 длиной 128 точек, на котором максимумы идентифицируются с периодами 44 мин 22,5 с ( $A = 0,54$  TECU), 17 мин 11,6 с ( $A = 0,19$  TECU) и 11 мин 23,0 с ( $A = 0,11$  TECU), которые были выбраны в записях уровнемерной станции 14.



Рис. 4.10. Трек ВКМ2-G27.

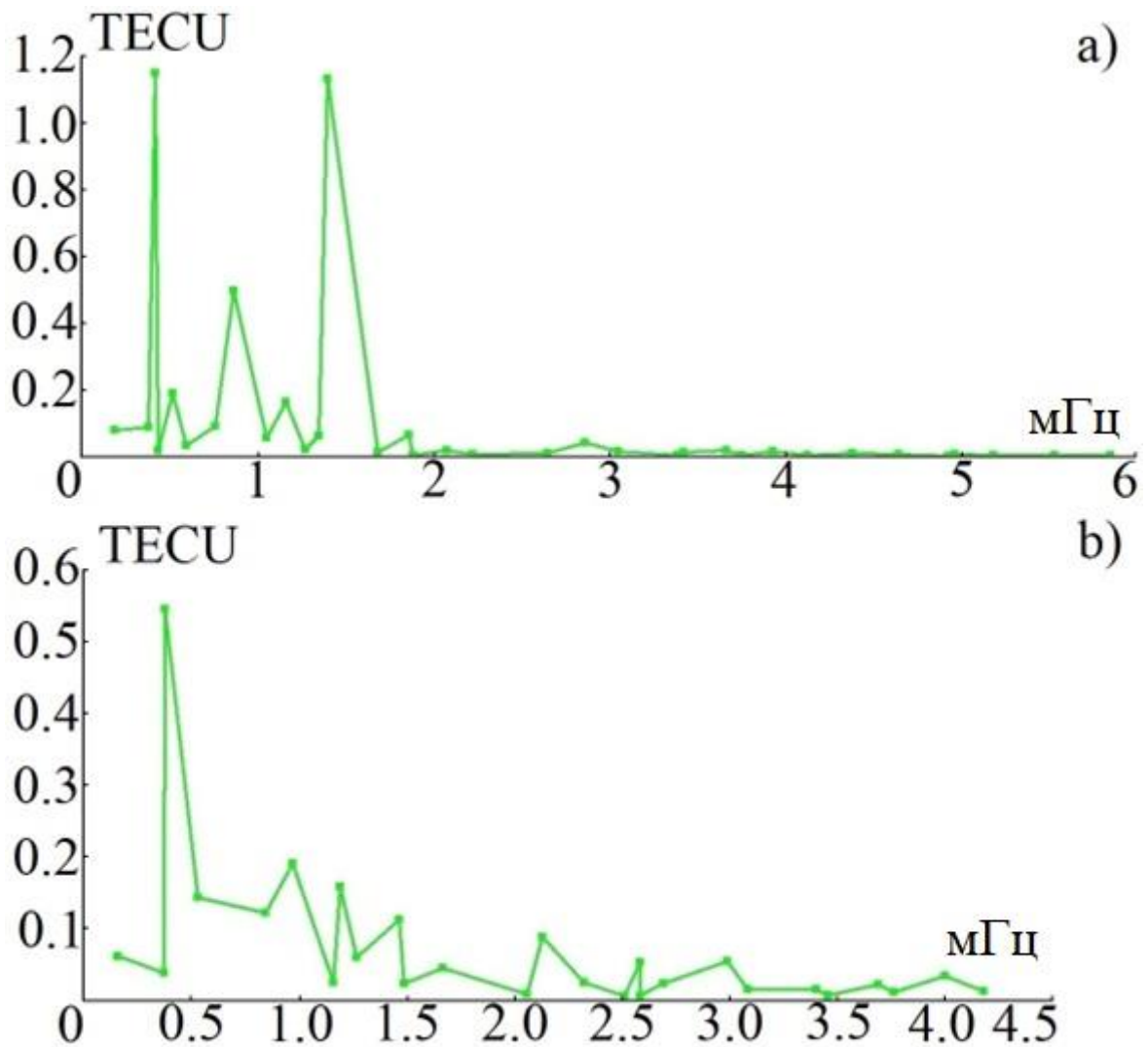


Рис. 4.11. Спектр, полученный в результате обработки первого участка записи трека VKM2-G27 (а) и второго участка записи трека VKM2-G27 (б).

### 4.3. Выводы по главе

В ходе обработки данных об изменениях ТЕС в ионосфере, полученных с помощью ГНСС по лучу ГНСС-приемник – спутник, было выявлено совпадение периодов основных выбранных максимумов с большой точностью. Эти периоды также обнаруживаются при анализе данных уровнемерных станций, приведенных в [95], для участков трассы передачи данных ГНСС-приемник – спутник, расположенных вблизи соответствующих уровнемерных станций.

Результаты исследования показывают: периоды колебаний, выявленные в данной работе и в работе [95], соответствуют одним и тем же периодам собственных колебаний атмосферных областей над конкретными территориями и акваториями Земли. Возбуждение этих колебаний, вызванное различными мощными источниками, распространяющимися в атмосфере, приводит не только к их возбуждению, но и к генерации метеоцунами в отдельных заливах при определенном совпадении периодов собственных атмосферных колебаний с периодами сейш этих заливов.

## Заключение

Результаты исследований, полученные в рамках работы, позволили сделать следующие выводы:

Основной средой распространения возмущений, вызванных взрывным извержением вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 года в 04:02 UTC являлась атмосфера. С помощью сравнения результатов обработки лазерных деформографов лазерного нанобарографа и ГНСС-данных ионосферы, установлено, что зафиксированные колебания Земной коры в районе МЭС «м. Шульца» были вызваны возмущениями атмосферы, приход колебаний через Земную кору от вулкана не зафиксирован. По результатам обработки данных морских уровнемерных станций установлено, что зафиксированные колебания морской поверхности не являются следствием возникновения классического цунами, а вызваны распространением метеоцунами, которое в свою очередь возбуждалось распространяющимся в атмосфере мощным импульсом, появившемся в результате взрывного извержения вулкана.

По результатам совместной обработки данных уровнемерных станций и ГНСС-данных ионосферы получены значения периодов и определен первоисточник колебаний гидросферного слоя (морской поверхности) и слоя ионосферы (в пределах конкретных областей), первоисточником зафиксированных колебаний служат собственные колебания атмосферы.

Созданный и развиваемый атмосферно-гидросферно-литосферный комплекс позволил провести исследование состояния и взаимодействия геосфер и получить важные научные выводы.

## Список литературы

1. Dolgikh G., Budrin S., Dolgikh S., Bolsunovskii M., Ivanov M. Planetary laser interferometric seismoacoustic observatory // *Sensors*. — 2025. — Vol. 25, Iss. 1. — Art.no. 48. DOI: 10.3390/s25010048.
2. Долгих Г.И., Болсуновский М.А., Будрин С.С. Восточная часть планетарной лазерно-интерферометрической сейсмоакустической обсерватории // *Геология и геофизика*. — 2025. — № 4. — С. 529-536. DOI: 10.15372/GIG2024173.
3. Долгих Г.И., Болсуновский М.А., Будрин С.С., Долгих С.Г., Чупин В.А., Швец В.А. Межгеосферное взаимодействие в гравитационном и инфрагравитационном диапазонах // *Физика геосфер: мат докл. XIII Всеросс. симпоз., В-восток, 11-15 сент. 2023.* — 2023. — С. 339-341. DOI: 10.34906/9785604968383.339.
4. Долгих Г.И., Антонов В.А., Болсуновский М.А., Будрин С.С., Долгих С.Г., Иванов М.П., Овчаренко В.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Комплексный подход к исследованиям геосферных волновых процессов // *Экологические системы и приборы*. — 2025. — № 11. — С. 31-41. DOI: 10.25791/esip.11.2025.1556.
5. Михаленко Е.Б. Инженерная геодезия. Современные методы геодезических измерений с использованием искусственных спутников Земли: учеб. пособие / Михаленко Е.Б., Загрядская Н.Н., Беляев Н.Д., Вилькевич В.В., Петров В.В., Смирнов А.А. под научн. ред. Михаленко Е.Б. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. — 80 с.
6. Прикладной потребительский центр ГЛОНАСС. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения [Электронный ресурс]: <https://glonass-iac.ru/>.

7. An official website of the United States government the Global Positioning System [Электронный ресурс]: <https://www.gps.gov/>.
8. BeiDou Navigation Satellite System [Электронный ресурс]: <http://www.beidou.gov.cn/>.
9. Galileo Open Service [Электронный ресурс]: <https://galileognss.eu/>.
10. Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) Official Website [Электронный ресурс]: <https://qzss.go.jp/>.
11. Indian Space Research Organisation (ISRO) [Электронный ресурс]: <https://www.isro.gov.in/>.
12. Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос» [Электронный ресурс]: <https://www.roscosmos.ru/>.
13. ООО «Фирма Г.Ф.К.»: официальный сайт [Электронный ресурс]: <https://www.gfk-leica.ru/>.
14. Габсатаров Ю.В., Владимирова И.С., Сдельникова И.А. Геодинамический мониторинг в ФИЦ ЕГС РАН: современное состояние и перспективы развития // Российский сейсмологический журнал. — 2022. — Т. 4, № 4. — С. 7-23. DOI 10.35540/2686-7907.2022.4.01.
15. Шестаков Н.В., Герасименко М.Д., Кишкина А.К., Быков В.Г., Пупатенко В.В., Прытков А.С., Василенко Н.Ф., Жижерин В.С., Яковенко С.В. Методика объединения косейсмических смещений земной коры по данным разнородных геодезических сетей: на примере мегаземлетрясения Тохоку 11.03.2011 г., Mw 9.1 // Геодинамика и тектонофизика. — 2024. — Т. 15, № 1 — 0736. DOI: 10.5800/GT-2024-15-1-0736.
16. Кишкина А.К., Шестаков Н.В., Лисина И.А., Василевский Д.Н. О некоторых аспектах применения ГНСС-технологий в метеорологии и экологии // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2023. — Т. 4, № 1. — С. 89-97. DOI: 10.33764/2618-981X-2023-4-1-89-97.

- 17.Афраймович Э.Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э.Л. Афраймович, Н.П. Перевалова — Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. — 480 с.
- 18.Трофимов Д.А., Петров С.Д., Серов Ю.А., Чекунов И.В., Смирнов С.С., Гришина А.С., Желтова К.В., Трошичев О.А. Определение полного электронного содержания ионосферы над станцией «Восток» по ГНСС-наблюдениям // Труды Института прикладной астрономии РАН. — 2020. — № 52. — С. 68-71. DOI: 10.32876/applastron.52.68-71.
- 19.Хабутдинов Ю. Г. Учение об атмосфере: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Экология" / Хабутдинов Ю.Г., Шанталинский К.М., Николаев А.А. — Казань: Казанский гос. ун-т, 2010. — 244 с. — ISBN 978-5-98180-805-0.
- 20.Редичкин Н.Н. Физика Земли и атмосферы: учебное пособие / Редичкин Н.Н. Самсонова Н.В. — Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2015. — 148 с.
- 21.Вшивкова О.В. Физика Земли и атмосферы. Влияние атмосферы на результаты геодезических измерений: Учебное пособие / Вшивкова О.В. — М.: МИИГАиК, 2017.— 88 с.
- 22.Серапинас Б.Б. Глобальные системы позиционирования: Учеб. изд. / Серапинас Б.Б. — М.: ИКФ «Каталог», 2002. — 106 с. — ISBN 5-94349-032-9.
- 23.Hofmann-Wellenhof B. GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more / Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. — 1st ed.; Springer: Vienna, Austria. — 2008. — 518 p. ISBN 978-3-211-73012-6.
- 24.Astafyeva, E. Ionospheric detection of natural hazards // Rev. Geophys. — 2019. — Vol. 57, Iss. 4. — P. 1265–1288. DOI: 10.1029/2019RG000668.
- 25.Benioff H. A linear strain seismograph // Bulletin of the Seismological Society of America. — 1935. — Vol.25, №4. — P.283-309.



26. Кварцевый деформограф / В кн.: "Каталог геофизической аппаратуры". (Информационный справочник). Вып.4. М.: Наука. 1981. С.146-148.
27. Bilham R.G. The location of Earth strain instrumentation // *Philosophical Transactions Royal Society Lond. A.* — 1973. — Vol.274. — P.429-433. DOI: 10.1098/rsta.1973.0072.
28. Levine J., Hall J.L. Design and operation of a methane absorption stabilized laser strainmeter // *Journal of Geophysical Research.* — 1972. — Vol.77, №14. — P. 2595-2610. DOI: 10.1029/JB077i014p02595.
29. Вали В., Кругстад Р., Мосс Р. Интерферометр с ОКГ для измерения деформаций земной поверхности // *ТИИЭР.* — 1965. — №9. — С.186-194.
30. Вали В., Бостром Р.С. Лазерный интерферометр с базой 1000 м // *Приборы для научных исследований.* — 1968. — Т.39, №9. — С.52-61.
31. Vali V., Bostrom R.C. Some earth strain observations with a thousand-meter laser interferometer // *Earth Planet. Sci. Lett.* — 1968. — Vol.4, №6. — P.436-438.
32. Вейли В. Лазеры, измерения деформаций земной коры с помощью лазера // В кн.: "Над чем думают физики". М.: Наука. — 1965. — С.125-138.
33. King G.C.P., Gerard V.B. Earth tides recorded by the 55-m Cambridge laser strainmeter // *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.* — 1974. — Vol.39. — P.269-282. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1969.tb03577.x.
34. Berger R.J., Hall J.L. // *Phys. Rev. Lett.* — 1969. — Vol.22. — P.4-8.
35. Dolgikh G.I., Butyrin P.G., Dolgikh S.G., Dyagilev R.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V. Recording of Infrasound Deformation Perturbations by Spatially Separated Laser Strainmeters // *Doklady Earth Sciences.* — 2011. — Vol. 441. Part 1. — P. 1583–1586. DOI: 10.1134/S1028334X11110237.
36. Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г., Болсуновский М.А., Иванов М.П. Создание планетарной лазерно-интерферометрической обсерватории // *Океанологические исследования: материалы XI Всерос. конф. молодых ученых*

- с междунар. участием, 26-30 мая 2025 г., г. Владивосток, Россия. — 2025. — С. 48. DOI: 10.62994/b7314-9428-9558-w.
37. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Корень И.А., Новикова О.В., Овчаренко В.В., Окунцева О.П., Швец В.А., Чупин В.А., Яковенко С.В. Лазерный нанобарограф и его применение при его изучении баро-деформационного взаимодействия // Физика Земли. — 2004. — № 8. — С. 82-90.
38. РД 52.10.842-2017 Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 9. Гидрометеорологические наблюдения на морских станциях и постах. Часть I. Гидрологические наблюдения на береговых станциях и постах / Росгидромет. — Введ. 27.11.2017. — 385 с.
39. Sea Level Station Monitoring Facility [Электронный ресурс]: <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/map.php>.
40. Dolgikh G., Budrin S., Dolgikh S., Chupin V., Shvets V. Inter-geosphere interaction in the infrasonic range // *Frontiers in Earth Science*. — 2023. — Vol. 11. — Art.no. 1146224. DOI: 10.3389/feart.2023.1146224.
41. Архипова Е.В., Брянцева Г.В., Жигалин А.Д. Взаимосвязь сильных землетрясений, вулканических извержений и тайфунов в районе филиппинской плиты как результат взаимного влияния геосфер // *Вестник московского университета. Серия 4: Геология*. — 2021. — Том 1, №4 — С.14-22. DOI: 10.33623/0579-9406-2021-4-14-22.
42. Адушкин В.В., Спивак А.А Проблемы взаимодействия геосфер и физических полей в приповерхностной геофизике // *Физика Земли*. — 2019. — № 1. — С. 4-15. DOI 10.31857/S0002-3337201914-15.
43. Contardo S., Symonds G., Segura L.E., Lowe R.J., Hansen J.E. Infragravity wave energy partitioning in the surf zone in response to wind-sea and swell forcing // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2019. — Vol.7 (11). — P. 383. DOI: 10.3390/jmse7110383.

44. Rabinovich A., Monserrant S. Generation of Meteorological Tsunamis (large amplitude seiches) Near the Balearic and Kuril Islands // *Natural Hazards*. — 1998. — Vol. 18. — P. 27–55. DOI: 10.1023/A:1008096627047.
45. Ермоленко С.И., Швед Г.М. Генерация собственных колебаний Земли атмосферными движениями // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. — 2016. — Том 9, №4. — С. 3-6.
46. Fukao Y., Nishida K., Suda N., Nawa K., Kobayashi N. A theory of the Earth's background free oscillations // *Journal of Geophysical Research*. — 2002. — Vol. 107 (9). DOI: 10.1029/2001JB000153
47. Kobayashi N., Nishida K. Continuous excitation of planetary free oscillations by atmospheric disturbances // *Nature*. — 1998. — Vol. 395. — Iss. 6700. — P. 357-360. DOI:10.1038/26427.
48. Nishida K., Kobayashi N., Fukao Y. Resonant Oscillations Between the Solid Earth and the Atmosphere // *Science*. — 2000. — Vol. 287. — Iss. 5461. — P. 2244–2246. DOI:10.1126/science.287.5461.2244.
49. Nishida K., Kobayashi N., Fukao Y. Origin of Earth's ground noise from 2 to 20 mHz // *Geophysical Research Letters*. — 2002. — Vol. 29 (10). — Art.no. 1413. DOI:10.1029/2001GL013862.
50. Tanimoto T. Continuous Free Oscillations: atmosphere-Solid Earth Coupling // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. — 2001. — Vol. 10 (29). — P. 563-584. DOI: 10.1146/annurev.earth.29.1.563.
51. Alekseev A.V., Valentin D.I., Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Kovalev S.N., Koren I.A., Ovcharenko V.V., Kholodkevich E.D., Shvets V.A., Yakovenko S.V. Registration of infragravity waves at the hydrosphere-lithosphere boundary using coastal laser strainmeter // *Doklady Earth Sciences*. — 2003. — Vol. 389, No. 2. — P. 291-293.

52. Rhie J., Romanowicz B. Excitation of Earth's continuous free oscillations by atmosphere–ocean–seafloor coupling // *Nature*. — 2004. — Vol. 431, — P. 552–556. DOI:10.1038/nature02942.
53. Ekstrom G., Ekstrom S. Correlation of Earth's Long-Period Background Seismic Radiation with the Height of Ocean Waves // *Eos*. — 2005. — Vol. 86, No. 52. — Fall Meet. Suppl. Abstr. S34B-02.
54. Romanowicz B., Rhie J., Colas B. — Insights into the origin of the Earth's hum and microseisms // *Eos*. — 2005. — Vol. 86, No. 52. — Fall Meet. Suppl. Abstr. S31A-0271.
55. Webb S.C. The Earth's "hum" is driven by ocean waves over the continental shelves // *Nature*. — 2007. — Vol. 445. — P. 754–756. DOI:10.1038/nature05536.
56. Bullen K.E. The Earth's density / Bullen K.E. — Springer. — 1975. ISBN 978-94-009-5700-8. DOI: 10.1007/978-94-009-5700-8.
57. Park J., Amoruso A., Crescentini L., Boschi E. Long-period toroidal earth free oscillations from the great Sumatra-Andaman earthquake observed by paired laser extensometers in Gran Sasso, Italy // *Geophysical Journal International*. — 2008. — Vol. 173(3), — P. 887–905. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2008.03769.x.
58. Sobolev G.A. On some properties in the emergence and evolution of the oscillations of the Earth after earthquakes // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. — 2013. — Vol. 49, No. 5. — P. 610–625. DOI: 10.1134/S106935131305008X.
59. Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Smirnov S.V., Chupin V.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V. Infrasound oscillations in the Sea of Japan // *Doklady Earth Sciences*. — 2011. — Vol. 441, No. 1. — P. 1529-1532. DOI: 10.1134/S1028334X11110031.
60. Shved G.M., Ermolenko S.I., Karpova N.V., Wendt S., Jacobi C. Detecting global atmospheric oscillations by seismic instruments // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. — 2013. — Vol. 49, No. 2. — P. 278-288. DOI: 10.1134/S1069351313010138.

61. Guglielmi A.V., Zotov O.D. On the near-hourly hidden periodicity of earthquakes // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. — 2013. — Vol. 49, No. 1. — P. 1-8. DOI 10.1134/S1069351313010047.
62. Долгих С.Г., Долгих Г.И. Геосферные особенности проявления метеоцунами // *Физика Земли*. — 2019. — № 5. — С. 104-109. DOI: 10.31857/S0002-333720195104-109.
63. Рабинович А.Б., Шепич Я. Метеорологические цунами: что это такое? // *Природа*. — 2016. — № 1(1205). — С. 12-26.
64. Pattiaratchi C.B., Wijeratne E.M.S. Are meteotsunamis an underrated hazard? // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. — 2015. — Vol. 373. — Iss. 2053. DOI: 10.1098/rsta.2014.0377.
65. Monserrat S, Vilibić I, Rabinovich A.B. Meteotsunamis: atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band // *Natural Hazards and Earth System Science*. — 2006. — Vol. 6, No. 6. — P. 1035-1051. DOI: 10.5194/nhess-6-1035-2006.
66. Vilibić I., Šepić J. Destructive meteotsunamis along the eastern Adriatic coast: Overview // *Physics and Chemistry of the Earth*. — 2009. — Vol. 34. — P. 904-917. DOI: 10.1016/J.PCE.2009.08.004.
67. Šepić J., Vilibić I., Fine I. Northern Adriatic meteorological tsunamis: Assessment of their potential through ocean modeling experiments: Northern Adriatic meteotsunamis // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2015. — Vol. 120 (4). — P. 2993–3010. DOI: 10.1002/2015JC010795.
68. Šepić J., Vilibić I., Rabinovich A.B., Monserrat S. Widespread tsunami-like waves of 23-27 June in the Mediterranean and Black Seas generated by high-Altitude atmospheric forcing // *Scientific Reports*. — 2015. — Vol. 5 — Art.no. 11682. DOI: 10.1038/srep11682.

69. Proudman J. The Effects on the Sea of Changes in Atmospheric Pressure // *Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1929. — Vol. 2(4). — P. 197–209. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1929.tb05408.x.
70. Greenspan H.P. The generation of edge waves by moving pressure disturbances // *Journal of Fluid Mechanics*. — 1956. — Vol. 1. — P. 574–592.
71. Болсуновский М.А., Шестаков Н.В., Долгих Г.И., Перевалова Н.П., Тен А.С. Ионосферные возмущения над Приморским краем, вызванные извержением вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 г // *Геодинамика и тектонофизика*. — 2024. — Т. 15, № 1. — Art.no. 0738. DOI: 10.5800/GT-2024-15-1-0738.
72. Болсуновский М.А. Исследование ковулканических ионосферных аномалий, сгенерированных извержением вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 г., над территорией Приморского края и смежными районами // *Физика геосфер: мат докл. XIII Всеросс. сипоз., В-восток, 11-15 сент. 2023. . — 2023. — С. 295-298. DOI: 10.34906/9785604968383.295.*
73. Болсуновский М.А., Шестаков Н.В., Долгих Г.И., Перевалова Н.П. Поиск ионосферных возмущений, инициированных извержением вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 г., над территорией Приморского края // *Океанологические исследования: мат. X конф. молодых уч., 24 – 28 апр. 2023 г., Владивосток, ТОИ ДВО РАН. — 2023. — С. 194-196.*
74. Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) [Электронный ресурс]: <https://cddis.nasa.gov/index.html>.
75. Global Volcanism Program (GVP) [Электронный ресурс]: <https://volcano.si.edu/>.
76. Geophysical Centre Potsdam (GFZ) [Электронный ресурс]: <https://www.gfz-potsdam.de/en/>.
77. IRI (International Reference Ionosphere) Instant Run [Электронный ресурс]: <https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/instantrun/iri>.

78. Global Navigation Satellite Systems Laboratory [Электронный ресурс]: <http://www.gnss-lab.org/>.
79. Болсуновский М.А. Поиск и исследование ковулканических ионосферных возмущений, инициированных извержением вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 г., в дальней зоне (Приморский край РФ) // Конгресс молодых ученых Беларуси и России, Минск, 27-31 марта 2023 г. — Постоян. ком. Союз. государства, Нац. акад. наук Беларуси; редкол.: В. Г. Гусаков (гл. ред.) [и др.]. — Минск: Беларуская навука. 2023. — 333 с.: ил. 133-139.
80. Shestakov N., Orlyakovskiy A., Perevalova N., Titkov N., Chebrov D., Ohzono M., Takahashi H. Investigation of Ionospheric Response to June 2009 Sarychev Peak Volcano Eruption // *Remote Sensing*. — 2021. — Vol. 13, No. 4. — P. 1-18. DOI: 10.3390/rs13040638.
81. Themens D.R., Watson C., Žagar N., Vasylykevych S., Elvidge S., McCaffrey A., Prikryl P., Reid B., Wood A., Jayachandran P.T. Global propagation of ionospheric disturbances associated with the 2022 Tonga volcanic eruption // *Geophysical Research Letters*. — 2022. — Vol. 49. DOI: 10.1002/essoar.10510350.1.
82. Zhang S.-R., Vierinen J., Aa E., Goncharenko L.P., Erickson P.J., Rideout W., Coster A.J., Spicher A. 2022 Tonga Volcanic Eruption Induced Global Propagation of Ionospheric Disturbances via Lamb Waves // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. — 2022. — Vol. 9. — Art.no. 871275. DOI:10.3389/fspas.2022.871275.
83. Chen C.-H., Zhang X., Sun Y.-Y., Wang F., Liu T.-C., Lin C.-Y., Gao Y., Lyu J., Jin X., Zhao X., Cheng X., Zhang P., Chen Q., Zhang D., Mao Z., Liu J.-Y. Individual Wave Propagations in Ionosphere and Troposphere Triggered by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Underwater Volcano Eruption on 15 January 2022 // *Remote Sensing*. — 2022. — Vol. 14. — Iss. 2179. DOI: 10.3390/rs14092179.
84. Heki K. 2022. Ionospheric signatures of repeated passages of atmospheric waves by the 2022 Jan. 15 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption detected by QZSS-TEC

- observations in Japan // *Earth Planets Space*. — 2022. — Vol. 74. — Art.no. 112. DOI: 10.1186/s40623-022-01674-7.
85. Hong J., Kil H., Lee W.K., Kwak Y.-S., Choi B.-K., Paxton L.J. Detection of different properties of ionospheric perturbations in the vicinity of the Korean Peninsula after the Hunga-Tonga volcanic eruption on 15 January 2022. // *Geophysical Research Letters*. — 2022. Vol. 49 — Art.no. e2022GL099163. DOI: 10.1029/2022GL099163.
86. Artru J., Lognonne P., Blanc E. Normal modes modelling of post-seismic ionospheric oscillations // *Geophysical Research Letters*. — 2001. — Vol. 28, No. 4. — P. 697-700. DOI: 10.1029/2000GL000085.
87. Astafyeva E., Heki K., Kiryushkin V., Afraimovich E., Shalimov S. Two-mode long-distance propagation of coseismic ionosphere disturbances // *Journal of Geophysical Research*. — 2009. — Vol. 104. — Iss. A10307. DOI: 10.1029/2008JA013853.
88. Saito S. Ionospheric disturbances observed over Japan following the eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai on 15 January 2022 // *Earth Planets Space*. — 2022. — Vol. 74. — Art.no. 57. DOI: 10.1186/s40623-022-01619-0.
89. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Овчаренко В.В. Атмосферно-деформационные возмущения, вызванные вулканом Хунга-Тонго-Хунга-Хаапай // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. — 2022. — Т. 505, № 2. — С. 196-198. DOI: 10.31857/S2686739722080072.
90. Bagiya M.S., Kherani E.A., Sunil P.S., Sunil A.S., Sunda S., Ramesh D.S. Origin of the ahead of tsunami traveling ionospheric disturbances during Sumatra tsunami and offshore forecasting // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2017. — Vol. 122. — P. 7742-7749. DOI: 10.1002/2017JA023971.
91. Долгих Г.И., Болсуновский М.А. Нагружающее воздействие атмосферы на гидросферу // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. — 2024. — Т. 516, № 2. — С. 640-648. DOI: 10.31857/S2686739724060172.



92. Долгих Г.И., Болсуновский М.А., Долгих С.Г. Атмосферные ифрагравитационные возмущения Япономорского региона // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. — 2023. — Т. 511, № 1. — С. 105-111. DOI: 10.31857/S2686739723600340.
93. Sea Level Station Monitoring Facility [Электронный ресурс]: <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/map.php>.
94. Система мониторинга уровня моря [Электронный ресурс]: <http://www.rtw.s.ru/sea-level/>.
95. Dolgikh G., Dolgikh S., Ovcharenko V. Initiation of Infrasonic Geosphere Waves Caused by Explosive Eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha‘apai Volcano // Journal of Marine Science and Engineering. — 2022. — Vol. 10, Iss. 8. — Art.no. 1061. DOI: 10.3390/jmse10081061.
96. Kulichkov S.N., Chunchuzov I.P., Popov O.E., Gorchakov G.I., Mishenin A.A., Perepelkin V.G., Bush G.A., Skorokhod A.I., Vinogradov Yu A., Semutnikova E.G. et al. Acoustic-Gravity Lamb Waves from the Eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Hapai Volcano, Its Energy Release and Impact on Aerosol Concentrations and Tsunami // Pure and Applied Geophysics. — 2022. Vol. 179. — P. 1533-1548. DOI: 10.1007/s00024-022-03046-4.
97. Matoza R.S., Fee D., Assink J.D., Iezzi A.M., Green D.N., Kim K., Toney L., Lecocq T., Krishnamoorthy S., Lalande J.-M., et al. Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga // Science. — 2022. — Vol. 377 — P. 95-100.
98. Dolgikh G.I., Bolsunovskii M.A., Dolgikh S.G. Infrasonic oscillations in ionosphere and their manifestations in hydrosphere // Physical Oceanography. — 2026. — Vol. 1.
99. Rossi R.J. Mathematical Statistics: An Introduction to Likelihood Based Inference / Rossi R.J. — New York: John Wiley & Sons. — 2018. — 448 p. ISBN: 978-1-118-77104-4.